

INFORME TÉCNICO

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ATLÁNTICO C.R.A

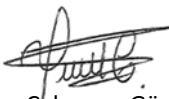
Caracterización fisicoquímica, hidrobiológica y microbiológica del embalse del Guájaro y desarrollo de un índice de calidad para su gestión.

**BARRANQUILLA/ATLÁNTICO
MAYO 2022**



INFORME TÉCNICO DE ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL**Elaboró:**

Valerie M. Gómez Domínguez

Revisó:

Yuliza Cabarcas Güette

Aprobó:

Ángel Barrera Ibarra

El monitoreo fue desarrollado por SERAMBIENTE S.A.S, empresa acreditada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), a través de la Resolución 1013 de 2019, vigente hasta el 12 de septiembre de 2023, para producir información cuantitativa física y química para los estudios o análisis ambientales requeridos por las autoridades competentes, ubicada en la Carrera 41 # 73B – 72 en la ciudad de Barranquilla. El grupo de trabajo estuvo conformado por los siguientes profesionales de SERAMBIENTE S.A.S:

CARLOS SULBARAN VILLAFANE

Ingeniero de Campo

VALERIE M. GÓMEZ DOMÍNGUEZ

Analista técnico

ÁNGEL BARRERA IBARRA

Gerente



TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	11
2.	OBJETIVOS	12
2.1.	OBJETIVO GENERAL	12
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3.	GENERALIDADES.....	13
3.1	ALCANCE	13
3.2	NORMATIVA DE REFERENCIA	13
3.3	INFORMACIÓN DE LA EMPRESA	13
3.4	EMPRESA RESPONSABLE DEL ESTUDIO	14
3.5	TELEDETECCIÓN.....	16
4.	METODOLOGÍA.....	19
4.1	CARACTERÍSTICAS DEL MONITOREO	19
4.2	UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MONITOREO.....	20
4.3	PROCESO METODOLÓGICO.....	21
4.3.1.	Etapas de preparación.	22
4.3.2.	Etapas de campo.	23
4.3.3.	Etapas de laboratorio.....	28
4.4	DISEÑO DEL ÍNDICE DE CALIDAD	29
4.4.1.	Selección de parámetros.	29
4.4.1.1.	Criterio bibliográfico.....	29
4.4.1.2.	Criterio Normativo.....	29
4.4.1.3.	Criterio Estadístico.....	30
4.4.2.	Desarrollo de subíndices y curvas de calidad.	30
4.4.3.	Asignación de pesos a los subíndices.	30
4.4.4.	Agregación de subíndices a la fórmula matemática.....	31
4.4.5.	Establecimiento de la escala de calidad.	32
4.4.6.	Validación.	32
5.	NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA.....	33
6.	RESULTADOS.....	36
6.1	CARACTERIZACIÓN	36
6.1.1.	Variables fisicoquímicas	36
6.1.2.	Variables Microbiológicas.....	46
6.1.3.	Variables Hidrobiológicas.	48
6.1.3.1.	Fitoplancton.....	48
6.1.3.2.	Zooplancton.....	58
6.1.3.3.	Perifiton.	69
6.1.3.4.	Macrófitas.....	76
6.1.3.5.	Macroinvertebrados bentónicos.	79
6.1.3.6.	Ictiofauna.....	88



6.2. ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUAS — EMBALSE DEL GUÁJARO.....	93
6.2.1. Selección de parámetros.....	93
6.2.2. Criterio bibliográfico.....	93
6.2.3. Criterio Normativo.....	94
6.2.4. Criterio estadístico.....	95
6.2.5. Consolidado de variables seleccionadas.....	105
6.2.6. Construcción del índice y curvas de calidad.....	106
6.2.6.1. Subíndice concentración de metales pesados.....	107
6.2.6.2. Subíndice condiciones básicas del medio.....	110
6.2.6.3. Subíndice Materia orgánica y condiciones microbiológicas en la columna de agua.....	112
6.2.6.4. Subíndice de contaminación residual.....	113
6.2.6.5. Subíndice de productividad.....	114
6.2.7. Agregación.....	116
6.2.8. Selección de la escala.....	118
6.2.9. Validación.....	118
7. CONCLUSIONES.....	123
8. REFERENCIAS.....	130
9. ANEXOS.....	141



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Empresas responsables de los análisis de las muestras para agua superficial.	14
Tabla 2. Datos generales del estudio.	15
Tabla 3. Bandas de Landsat 8.	18
Tabla 4. Ubicación geográfica de los puntos de monitoreo.	20
Tabla 5. Registro fotográfico de soluciones Buffer empleadas y etiqueta de envases.	23
Tabla 6. Metodología de toma de muestras.	23
Tabla 7. Tipo de envase y preserva.	26
Tabla 8. Equipos y métodos analíticos para la medición de los parámetros <i>In-situ</i>	28
Tabla 9. Listado de los métodos empleados para el análisis de las muestras.	28
Tabla 10. Artículo 2.2.3.3.9.10 – Decreto 1076/2015 y artículo 18 Decreto 703 de 2018.	33
Tabla 11. Límites de control para variables fisicoquímicas en la Resolución 0000449 de 2021 de la CRA.	34
Tabla 12. Clasificación taxonómica de las morfoespecies del fitoplancton observadas en el Embalse del Guájaro.	48
Tabla 13. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies del fitoplancton en Embalse del Guájaro.	53
Tabla 14. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies del fitoplancton en Embalse del Guájaro.	54
Tabla 15. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies del fitoplancton en Embalse del Guájaro.	56
Tabla 16. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies del fitoplancton en Embalse del Guájaro.	57
Tabla 17. Índices ecológicos calculados a la comunidad del perifiton en el Embalse del Guájaro.	58
Tabla 18. Clasificación Taxonómica del zooplancton en el Embalse Del Guájaro.	59
Tabla 19. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies de Zooplancton en Embalse del Guájaro parte 1.	61
Tabla 20. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies de Zooplancton en Embalse del Guájaro, parte 2.	62
Tabla 21. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies de Zooplancton en Embalse del Guájaro parte 1. ...	63
Tabla 22. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies de Zooplancton en Embalse del Guájaro parte 2. ...	63
Tabla 23. Índices ecológicos aplicados a la comunidad de zooplancton en el Embalse del Guájaro parte 1... 68	68
Tabla 24. Índices ecológicos aplicados a la comunidad de zooplancton en el Embalse del Guájaro parte 2... 68	68
Tabla 25. Clasificación taxonómica de las morfoespecies del perifiton observadas en el Embalse del Guájaro.	69
Tabla 26. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies del perifiton en Embalse del Guájaro durante el año 2022 74	74
Tabla 27. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies del perifiton en Embalse del Guájaro durante el año 2022.	75
Tabla 28. Índices ecológicos calculados a la comunidad del perifiton en el Embalse del Guájaro.	76



Tabla 29. Riqueza de las macrófitas acuáticas reportadas en el Embalse del Guájaro.	76
Tabla 30. Porcentaje de Cobertura (%) de las macrófitas acuáticas en el Embalse del Guájaro.	77
Tabla 31. Índices ecológicos calculados a la comunidad de macrófitas acuáticas en el Embalse del Guájaro.	79
Tabla 32. Clasificación Taxonómica de los macroinvertebrados bentónicos en el Embalse del Guájaro.	80
Tabla 33. Densidad (Ind/m ²) de las morfoespecies de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro parte 1.	82
Tabla 34. Densidad (Ind/m ²) de las morfoespecies de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro, parte 2.	83
Tabla 35. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro parte 1.	83
Tabla 36. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro parte 2.	84
Tabla 37. Índices ecológicos aplicados a la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en el Embalse del Guájaro	88
Tabla 38. Clasificación taxonómica de las especies ícticas reportadas en el embalse del Guájaro.	88
Tabla 39. Abundancia reportada por las especies ícticas en el embalse del Guájaro durante el monitoreo 1.	89
Tabla 40. Abundancia relativa (%) reportada por las especies ícticas en el embalse del Guájaro en el monitoreo 1.	90
Tabla 41. Abundancia reportada por las especies ícticas en el embalse del Guájaro en el monitoreo 2.	90
Tabla 42. Abundancia relativa (%) reportada por las especies ícticas en el embalse del Guájaro en el monitoreo 2.	90
Tabla 43. Constancia de las especies entre los monitoreos realizados.	92
Tabla 44. Parámetros de mayor utilización en los índices de calidad de aguas revisados.	94
Tabla 45. Parámetros mayormente controlados en la normativa nacional e internacional de calidad de aguas y frecuencia de aparición en las mismas.	95
Tabla 46. Eigenvalores del análisis de componentes principales (ACP).	96
Tabla 47. Peso de las variables en los componentes. *: Peso de las variables en cada componente ≥ 0.2 **: Suma de los pesos de los componentes en los que las variables tienen mayor inercia ≥ 34.63	97
Tabla 48. Variables seleccionadas a partir del análisis de componentes. ZooR: Riqueza del zooplancton; fito D, Densidad del fitoplancton; C y D: Densidad de Cyanophytas.	102
Tabla 49. Correlaciones de Pearson más significativas entre las variables.	102
Tabla 50. Correlaciones seleccionadas mediante criterio estadístico.	104
Tabla 51. Consolidado de variables y agrupación de acuerdo con la condición relacionada.	105
Tabla 52. Escala de calidad para determinar la condición ambiental de las ciénagas con el ICAcc.	118
Tabla 53. Resultado del ICA Guájaro para el período dic/2021 – ene/2022.	119



Tabla 54. Resultados de los análisis de laboratorio en tres puntos del embalse del Guájaro, durante un evento de mala calidad del agua por mortalidad de animales domésticos y peces, registrado en marzo de 2019. 120

Tabla 55. Resultados del ICA Guájaro para el evento de marzo de 2019. 121



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Firmas espectrales.	17
Figura 2. Localización geográfica de los puntos de monitoreo en el embalse del Guájaro.	21
Figura 3. Actividades de la etapa de preparación.	22
Figura 4. Flujograma del proceso de remisión de muestras.	26
Figura 5. Variación de la temperatura, pH y oxígeno disuelto en el Embalse del Guájaro.	37
Figura 6. Variación de la DBO ₅ y la DQO en el Embalse del Guájaro.	38
Figura 7. Variación de los sólidos suspendidos totales (SST), clorofila-a y la transparencia en el Embalse del Guájaro.	39
Figura 8. Variación de la conductividad y los sólidos disueltos totales (SDT) en el Embalse del Guájaro.	41
Figura 9. Variación de la dureza cálcica y dureza total en el Embalse del Guájaro.	42
Figura 10. Variación de los fosfatos y el fósforo total en el Embalse del Guájaro.	43
Figura 11. Variación de los sulfatos en el Embalse del Guájaro.	43
Figura 12. Variación de los nitratos, nitritos y el amoníaco en el Embalse del Guájaro.	45
Figura 13. Variación del arsénico, cobre y plomo en el Embalse del Guájaro.	46
Figura 14. Variación de coliformes termotolerantes (CTE), coliformes totales (CT) y <i>Pseudomonas</i> en el Embalse del Guájaro.	48
Figura 15. Contribución porcentual de las Divisiones fitoplanctónicas a la densidad total en el Embalse del Guájaro A) año 2022 y B) año 2021.	50
Figura 16. Densidad (Ind/cm ²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad fitoplanctónica en el Embalse del Guájaro, contrastando con el monitoreo del año 2021.	51
Figura 17. Densidad (Ind/cm ²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad fitoplanctónica en el Embalse del Guájaro A) Año 2022 B) Año 2021.	53
Figura 18. Densidad (Ind/L) total y Riqueza (No. Morfoespecies) total de la comunidad de zooplancton en Embalse Del Guájaro en las dos campañas.	60
Figura 19. Densidad (Ind/L) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad de zooplancton en Embalse del Guájaro. P* Campaña 2.	65
Figura 20. Contribución porcentual de la densidad total de los phylum zooplanctónicos en el Embalse del Guájaro.	66
Figura 21. Contribución a la densidad total de los phylum en los puntos de monitoreo en el Embalse del Guájaro.	67
Figura 22. Contribución porcentual de las Divisiones del perifiton a la densidad total en el Embalse del Guájaro. A) Año 2022 y B) Año 2021.	71
Figura 23. Densidad (Ind/cm ²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad perifítica en el Embalse del Guájaro contrastando los años 2022 y 2021.	72



Figura 24. Densidad (Ind/cm ²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad perifítica en el Embalse del Guájaro	73
Figura 25. Porcentaje de cobertura de las macrófitas acuáticas en el Embalse del Guájaro.	78
Figura 26. Densidad (Ind/m ²) total y Riqueza (No. Morfoespecies) total de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en Embalse Del Guájaro en las dos campañas.	81
Figura 27. Densidad (Ind/m ²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro. Escala logarítmica. P* Campaña 2.....	85
Figura 28. Contribución porcentual de la densidad total de los phylum en el Embalse del Guájaro.....	85
Figura 29. Contribución a la densidad total de los phylum en los puntos de monitoreo en el Embalse del Guájaro. Escala logarítmica.	87
Figura 30. Riqueza y abundancia de la ictiofauna en el embalse del Guájaro en los monitoreos 1 y 2.	92
Figura 31. Gráfico 2D del ACP para las variables de calidad de agua del embalse del Guájaro. P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9: periodo de lluvia. P1S, P2S, P3S, P4S, P5S, P6S, P7S, P8S, P9S: Periodo seco.	101
Figura 32. Curva de calidad para el arsénico. a= -14.533155 b= -29.140583 coeficiente de correlación (r)=0.96	109
Figura 33. Curva de calidad para el cobre. a= 56,194966 b= 0,393245, c= -0,093303 coeficiente de correlación (r)=0.98	109
Figura 34. Curva de calidad para el plomo. a= 41,144071 b= 0,839871, c= -0,136524 coeficiente de correlación (r)=0.89	109
Figura 35. Curva de calidad para el oxígeno disuelto. a= 9,176524 b= 1,567826 c= -0,268813 d= 0,023240 coeficiente de correlación (r)=0,88.....	111
Figura 36. Curva de calidad para el pH. a= 0,0000000445812 b= 0,0355519, c= 23,123719 coeficiente de correlación (r)=0.94	111
Figura 37. Curva de calidad para los sólidos suspendidos totales. a= 99,851338 b= -0,00134323, coeficiente de correlación (r)=0.97	112
Figura 38. Curva de calidad para la DBO5. a= 105,888345 b= 7,122255 c= 1,117340 coeficiente de correlación (r)=0,98	113
Figura 39. Curva de calidad para los coliformes Totales. a= 146,829078 b= 55,420159, c= -536,852998, d= 0,271930, coeficiente de correlación (r)=0.98.....	113
Figura 40. Curva de calidad para los detergentes (SAAM). a= 99,963862, b= -98,495035 c= 23,996120 coeficiente de correlación (r)=0,916.....	114
Figura 41. Curva de calidad para Grasas y Aceites. a= 104,501212 b= -0,164195, coeficiente de correlación (r)=0.84	114
Figura 42. Curva de calidad para nitratos (NO ₄). a= 8,888052, b= -0,925197, c= 0,00889319 coeficiente de correlación (r)=0,91	116
Figura 43. Curva de calidad para fosfatos (PO ₄). a= 0,00904846, b= 0,0316339, c= 0,864479coeficiente de correlación (r)=0.97	116



Figura 44. Curva de calidad para densidad de fitoplancton. $a= 118,436383$, $b= 58,782826$, $c= -171,161222$, $d= 0,175271$, coeficiente de correlación $(r)=0.98$ 116



1. INTRODUCCIÓN

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ATLÁNTICO C.R.A, contrató los servicios de **SERAMBIENTE S.A.S**, para desarrollar una caracterización de agua superficial en nueve (9) puntos, ubicados en el embalse del Guájaro en el departamento del Atlántico; con el fin de verificar el estado de la calidad del agua para su programa de control y seguimiento ambiental.

El monitoreo se llevó a cabo los días 12 de diciembre de 2021 y 22 de enero de 2022. Las muestras in situ fueron tomadas integradas y el resto de manera puntual o simple, tomada por el laboratorio **SERAMBIENTE S.A.S**. y analizadas en conjunto con **SGS COLOMBIA S.A.S** y **LIMA S.A.S**, dichos laboratorios se encuentran acreditados por el IDEAM para la toma de muestras y análisis de parámetros fisicoquímicos, hidrobiológicos y microbiológicos.

El presente informe presenta los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica, hidrobiológica y microbiológica de agua superficial y la elaboración de un índice de calidad de aguas para el embalse del Guájaro.





2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar la calidad del agua del embalse del Guájaro y elaborar un índice de calidad de aguas como herramienta complementaria para su diagnóstico.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar fisicoquímica, microbiológica e hidrobiológicamente el embalse del Guájaro durante dos periodos climáticos (lluvia y sequía).
-
- Generar un índice de calidad ambiental (ICA) a partir del análisis de caracterizaciones realizadas en el embalse e información complementaria.
- Determinar la calidad del agua del embalse a partir de los resultados obtenidos por el índice de calidad ambiental.



3. GENERALIDADES

3.1 Alcance

Análisis de calidad del agua del embalse del Guájaro en el departamento del Atlántico, basados en la caracterización fisicoquímica, microbiológica e hidrobiológica de las aguas superficiales, con la generación y aplicación de un índice de calidad ambiental (ICA).

3.2 Normativa de referencia

Se actúa con relación a la caracterización del agua superficial, teniendo en cuenta los requerimientos establecidos por el cliente, reportando las concentraciones obtenidas en los parámetros analizados, realizando comparaciones con los objetivos de calidad establecidos en la Resolución 0000449 de 2021 de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA y el Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, teniendo en cuenta como principal criterio de calidad la preservación de flora y fauna.

3.3 Información de la empresa

Razón Social:	CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ATLÁNTICO C.R.A
Ciudad:	Barranquilla
Departamento:	Atlántico
Dirección:	Carrera 66 # 54 - 43
Actividad Económica:	Empresa encargada de ejecutar las políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente y recursos naturales renovables, así como dar cumplimiento a las disposiciones legales vigentes.



3.4 Empresa responsable del estudio

El monitoreo fue realizado por el laboratorio de Servicios de Ingeniería y Ambiente S.A.S. Las empresas responsables de cada uno de los análisis se detallan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Empresas responsables de los análisis de las muestras para agua superficial.

Laboratorio	Parámetro	Resolución de Acreditación
SERAMBIENTE S.A.S	Oxígeno disuelto	Resolución 1013 de 2019
	Temperatura	
	pH	
	Conductividad	
	Dureza total	
	Dureza cálcica	
	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	
	Sólidos Disueltos Totales (SDT)	
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	
	Nitratos	
	Nitritos	
	Fósforo total	
	Fosfatos	
	Detergentes (SAAM)	
	Grasas y aceites	
	Hidrocarburos totales	
	Salinidad	
	Sulfuros	
	Sulfatos	
	Pesticidas	
	Clorofila a	
	Macrófitas	
	Fitoplancton	
	Zooplancton	
	Peces	
	Perifiton	
	Macroinvertebrados bentónicos	
	Ictiofauna	
SGS COLOMBIA S.A.S	Arsénico total	Resolución 0180 de 2020
	Cadmio total	
	Cobre total	
	Mercurio total	
	Nitrógeno amoniacal	
	Plomo total	
	Zinc	



Laboratorio	Parámetro	Resolución de Acreditación
SERAMBIENTE S.A.S	Oxígeno disuelto	Resolución 1013 de 2019
	Temperatura	
	pH	
	Conductividad	
	Dureza total	
	Dureza cálcica	
	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	
	Sólidos Disueltos Totales (SDT)	
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	
	Nitratos	
	Nitritos	
	Fósforo total	
	Fosfatos	
	Detergentes (SAAM)	
	Grasas y aceites	
	Hidrocarburos totales	
	Salinidad	
	Sulfuros	
	Sulfatos	
	Pesticidas	
	Clorofila a	
	Macrófitas	
	Fitoplancton	
	Zooplancton	
	Peces	
	Perifiton	
	Macroinvertebrados bentónicos	
	Ictiofauna	
	Pseudomona aeruginosa	
LIMA S.A.S.	Coliformes termotolerantes	Resolución 0555 de 2019
	Coliformes totales	

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Los datos generales del monitoreo, identificación de cada una de las muestras y los puntos de monitoreo, se detallan en la **Tabla 2. Mezcla**

Tabla 2. Datos generales del estudio.

Fecha de monitoreo	Monitoreo 1. 12 de diciembre de 2021
	Monitoreo 2. 22 de enero de 2022
Lugar de monitoreo	Embalse del Guájaro



Duración del monitoreo	2 días
Puntos de monitoreo	○ Punto 1. Guájaro ○ Punto 2. Guájaro ○ Punto 3. Guájaro ○ Punto 4. Guájaro ○ Punto 5. Guájaro ○ Punto 6. Guájaro ○ Punto 7. Guájaro ○ Punto 8. Guájaro ○ Punto 9. Guájaro
Tipo de estudio	Estudio de caracterización de agua superficial

**: El lago del cisne es el mismo que el rincón*

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2020.

3.5 Teledetección

De acuerdo con el análisis de Gómez y Dalence (2014) en la actualidad existe un monitoreo deficiente de la calidad del agua en Colombia, puesto que los análisis tradicionales implican un tiempo de toma de datos, transporte de las muestras y análisis de laboratorio, que además acarrearán un costo, que interfiere para obtener suficiente información del estado de calidad del agua. De manera convencional, los métodos empleados para la evaluación de la calidad del agua se han basado en mediciones realizadas en campo (Hakanson *et al*, 2005), con lo que se pueden lograr medidas precisas, aunque su obtención es costosa y demanda muchos recursos. No obstante, estos métodos no permiten obtener información en tiempo real, imposibilitando la gestión integral del recurso agua (Brivio *et al*. 2001).

En este sentido, las técnicas de teledetección, sensores remotos o de percepción remota, han demostrado utilidad para la estimación de algunos de los parámetros relacionados con índices de calidad del agua. Esto ha sido posible por el diseño de nuevos sensores satelitales con un incremento considerable de la resolución espacial, espectral y temporal con una mejora en la captación de la superficie terrestre (Feysa *et al*, 2014).



Son muchos los estudios enfocados en la teledetección como medio para la determinación de parámetros relativos a la calidad del agua en el ambiente marino, como la clorofila, el fitoplancton, la materia orgánica, sólidos disueltos en suspensión o turbidez. Igualmente, en ambientes continentales existe información sobre su aplicabilidad, sin embargo, la complejidad de estos sistemas relacionada con la contaminación, el arrastre de sedimentos y otros aspectos, hace compleja la obtención de modelos que puedan aplicarse de forma generalizada (Amado *et al*, 2018). Los sensores remotos son sistemas o instrumentos para captar información de un objeto a distancia (*remote sensor*). La teledetección o percepción remota (*remote sensing*) se refiere a la adquisición de datos de la superficie terrestre con un sensor remoto, y al procesamiento e interpretación de esos datos. Más específicamente, la teledetección es la captación de las características físicas de la superficie terrestre, basada en mediciones de radiación reflejada y emitida de cada componente de esa superficie (Chuvienco, 2010).

En otra instancia, según (Avila, 2019) la forma en la cual un objeto, emite o absorbe la energía conforme a un patrón espectral se denomina “*firma espectral*”, la misma permite identificar y discriminar diferentes objetos a partir de un perfil específico de radiancia emitida por elementos situados en la superficie de la tierra; la firma se captura a partir de la señal registrada por los sensores remotos en las diferentes porciones del espectro en función del objeto, su temperatura o la textura entre otros factores (**Figura 1**).

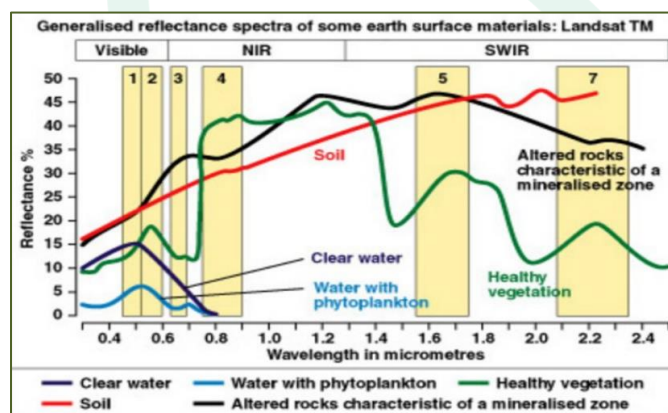


Figura 1. Firmas espectrales.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2022.



Las imágenes satelitales para la elaboración de este proyecto fueron tomas del satélite *Landsat 8* (formalmente la Misión de Continuidad de Datos Landsat, LDCM) (**Tabla 3**), siendo este lanzado en un cohete Atlas-V desde la Base de la Fuerza Aérea Vandenberg, California, el 11 de febrero de 2013; es el satélite lanzado más recientemente y lleva los instrumentos *Operational Land Imager* (OLI) y *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Landsat 8 orbita la Tierra en una órbita casi polar sincrónica con el sol, a una altitud de 705 km (438 millas), inclinada a 98,2 grados, y completa una órbita terrestre cada 99 minutos. El satélite tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial: 10:00 am +/- 15 minutos.

Tabla 3. Bandas de Landsat 8.

Número de	Nombre de la banda	Longitud de Onda (μm)		Resolución
1	Costera (Coastal)	0.43 - 0.45		30
2	Azul	0.45 - 0.51		30
3	Verde	0.53 - 0.59		30
4	Roja	0.63 - 0.67		30
5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 - 0.88		30
6	Infrarrojo de Onda Corta 1	1.57 - 1.65		30
7	Infrarrojo de Onda Corta 2	2.11 - 2.29		30
8	Pancromática (Pan)	0.50 - 0.68		15
9	Cirros (Cirrus)	1.36 - 1.38		30
TIRS	10	Sensor Térmico Infrarrojo 1 (TIRS 1)	10.60 - 11.19	30 (100)
TIRS	11	Sensor Térmico Infrarrojo 2 (TIRS 2)	11.50 - 12.51	30 (100)

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2020.

La combinación de bandas es un procedimiento que nos permite analizar elementos de específicos de la superficie terrestre en función de espectro de emisión. Para este proyecto, fue necesario utilizar la combinación de las bandas 6, 5 y 2 destacando la agricultura, y de manera inversa, se identifica el fitoplancton en los cuerpos de agua.



4. METODOLOGÍA

4.1 Características del monitoreo

El monitoreo se realizó según los requerimientos de la organización, los cuales fueron determinar las características fisicoquímicas, microbiológicas e hidrobiológicas de las muestras de agua superficial tomadas en el embalse del Guájaro departamento del Atlántico; seleccionados por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

Para las mediciones *in situ* se realizó la verificación de la calibración de los equipos utilizados, de lo cual se dejó registro en el formato de campo. Posteriormente se adelantó la medición de los parámetros de *conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH y temperatura*, efectuando las lecturas en la mayor brevedad posible, con el fin de minimizar la oxigenación natural de la muestra.

La toma de muestra de agua superficial se realizó los días 12 de diciembre de 2021 y 22 de enero de 2022. Para la toma de las coordenadas se dejó registro en el formato de campo. Previo a la toma de muestras se prepararon los reactivos y materiales necesarios para la preservación, envasado y la refrigeración de las muestras, según lo indicado en el American Standard Methods for Examination of Water and Wastewater Edición 23 (2017).

La toma de muestras del agua superficial se realizó integrada a 3 profundidades (superficie, medio y fondo) con botella muestreadora tipo Van Dorn para los parámetros *in situ* y puntual para los parámetros analizados por el laboratorio, siguiendo lo establecido en el procedimiento para muestreo de aguas (PO-PSM-45).



4.2 Ubicación de los puntos de monitoreo

En este numeral se presenta la ubicación y las características de los puntos de monitoreo de agua superficial, tomadas en el embalse del Guájaro en el departamento del Atlántico, seleccionadas por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico.

Los puntos de monitoreo se localizaron según el sistema Magna Sirgas origen WGS84, Bogotá y Nacional, las coordenadas se relacionan en la **Tabla 4**. Del mismo modo, en la **Figura 2** se puede observar la localización geográfica de los puntos de monitoreo.

Tabla 4. Ubicación geográfica de los puntos de monitoreo.

Características del monitoreo				
Tipo de muestreo	Integradas y Simples			
Tipo de sistema	Léntico			
Fecha de monitoreo:	12 de diciembre de 2021			
	22 de enero de 2022			
Puntos de monitoreo	Campaña de monitoreo 1		Campaña de monitoreo 2	
Punto 1. Embalse del Guájaro	75°4'49.95"	10°25'49"	75° 4'53.4"	10°25'33.98"
Punto 2. Embalse del Guájaro	75°3'59"	10°25'10"	75° 3'59.94"	10°26'10.24"
Punto 3. Embalse del Guájaro	75°7'02"	10°25'39"	75° 7'5.20"	10°25'40.64"
Punto 4. Embalse del Guájaro	75°7'6.18"	10°27'11.10"	75° 7'6.18"	10°27'11.10"
Punto 5. Embalse del Guájaro	75°4'48.08"	10°28'54.75"	75° 4'48.08"	10°28'54.75"
Punto 6. Embalse del Guájaro	75°4'58.1"	10°30'52.9"	75° 4'58.08"	10°30'52.01"
Punto 7. Embalse del Guájaro	75°1'47.21"	10°31'30.77"	75° 1'47.76"	10°31'30.63"
Punto 8. Embalse del Guájaro	75°2'2.2"	10°34'22.0"	75° 2'1.91"	10°34'22.33"
Punto 9. Embalse del Guájaro	75°5'3.57"	10°35'52.4"	75° 5'3.69"	10°35'52.62"

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2022.





Figura 2. Localización geográfica de los puntos de monitoreo en el embalse del Guájaro.

Fuente: Tomado y modificado de Google Earth, 2020.

4.3 Proceso metodológico

Los métodos empleados siguen los lineamientos y técnicas recomendados en la Guía para el Monitoreo de Vertimientos, Aguas Superficiales y Subterráneas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-U.S EPA en su Handbook for Analytical Quality Control in Water and Wastewater Laboratories, y por la Asociación Americana de Trabajos del Agua- AWWA- en el American Standard Methods for Examination of Water and Wastewater Edición 23 (2017), además de la norma técnica Colombiana NTC-ISO 17025 “Requisitos Generales de Competencia de Laboratorio de Ensayo y calibración (ICONTEC, 2005).



4.3.1. Etapa de preparación.

Esta etapa es fundamental para el adecuado funcionamiento de los demás procesos, pues es aquí donde se lleva a cabo toda la planeación y programación para que la fase de campo se desarrolle sin ningún inconveniente. En la **Figura 3** se muestran los pasos que se siguieron, con la finalidad de determinar los puntos de monitoreo y las pruebas realizadas en ellos.

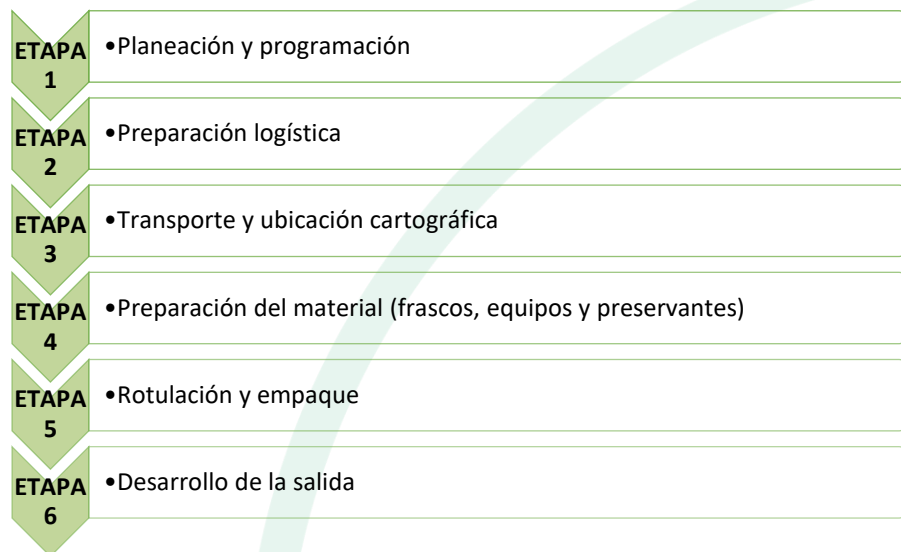
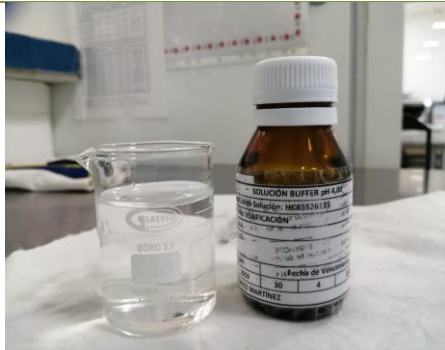
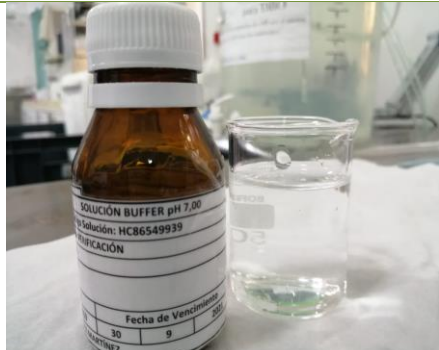
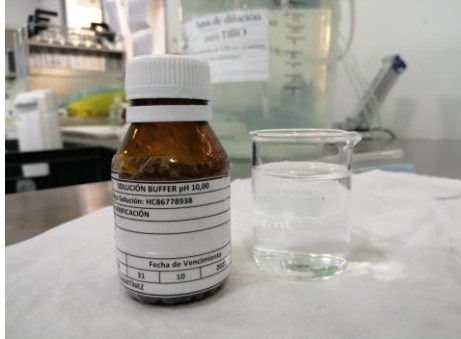
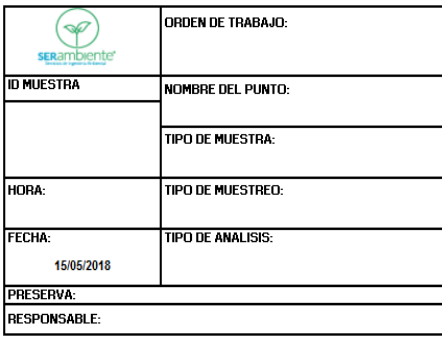


Figura 3. Actividades de la etapa de preparación.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2022.



Tabla 5. Registro fotográfico de soluciones Buffer empleadas y etiqueta de envases.

 Fotografía 1. Solución Buffer con pH de 4.00	 Fotografía 2. Solución Buffer con pH de 7.00
 Fotografía 3. Solución Buffer con pH de 10.00	 Fotografía 4. Etiqueta para rotular muestras.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2022.

4.3.2. Etapa de campo.

Para la toma de muestras en campo se implementó la metodología descrita en la **Tabla 6** y lo establecido en los procedimientos internos de SERAMBIENTE S.A.S, PO-PSM-01 Planeación y ejecución del servicio y PO-PSM-45 Muestreo de aguas. El tipo de muestra fue integrado y simple, el muestreo fue tipo “manual”; utilizando recipientes de vidrio ámbar o plástico-opaco, los cuales fueron preservados (acidificación y/o refrigeración) teniendo en cuenta el análisis a realizar, esto se detalla en la **Tabla 7**. En la **Tabla 9**, se presentan los equipos empleados para la medición de dichos parámetros, así como el método analítico empleado, límites de cuantificación e incertidumbre de estos.

Tabla 6. Metodología de toma de muestras.

Acción	Detalle
Verificar el plan de muestreo	Todos los muestreos realizados por el personal deben obedecer a un plan de muestreo, previamente elaborado y aprobado por el Ingeniero de Campo. El plan



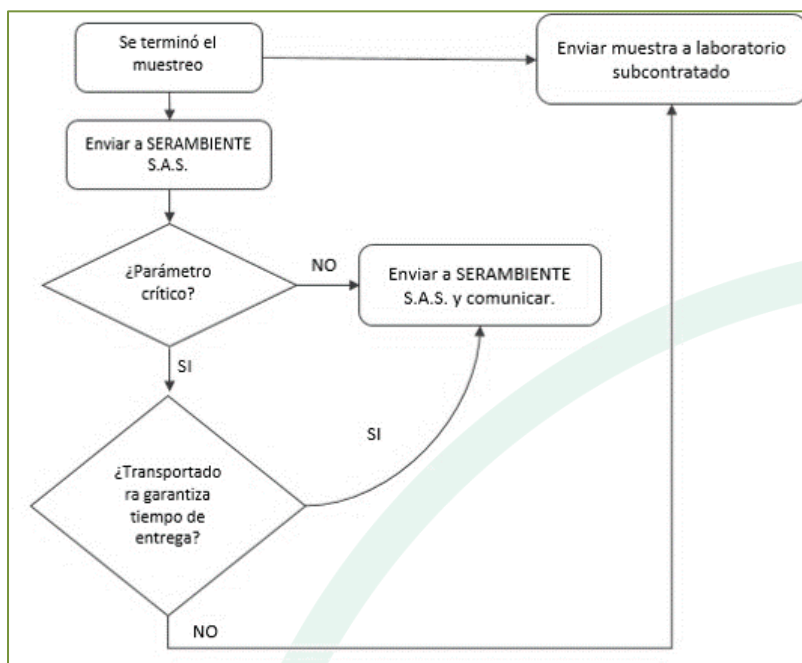
Acción	Detalle
	debe cumplir con los requerimientos del cliente y las condiciones del muestreo la información de interés debe ser relacionada en el formato de parámetros “ <i>In-situ</i> ”.
Verificación de los implementos requeridos	Verificar que se dispone de todos los equipos, recipientes, materiales, reactivos y suministros necesarios para el muestreo, de acuerdo con el tipo de muestreo a realizar, los parámetros a medir en campo y el tipo de muestras a obtener. Dichos implementos deben haber sido preparados con la debida anterioridad en el laboratorio.
Rotulación de envases	De acuerdo al plan de muestreo los recipientes antes de realizar el muestreo deben estar apropiadamente rotulados de acuerdo al análisis a realizar. El rótulo contiene los siguientes datos: Número de muestra, sitio de muestreo, análisis a realizar y preservación. Este rótulo se fija con cinta transparente ancha que lo cubre en su totalidad.
Reconocer el sitio de muestreo y el sistema de agua	Realizar un reconocimiento de todo el sistema de agua a muestrear, para tener información del proceso y dar una ubicación acertada al sitio de muestreo, de ser posible contar con las coordenadas del punto.
Ubicar y limpiar el punto de muestreo	Una vez ubicado el punto de muestreo se debe realizar una limpieza de sus alrededores para garantizar la seguridad de las operaciones y evitar la contaminación de las muestras. Según sea el caso, se deben retirar objetos, maleza, residuos y/o sustancias que obstaculicen o afecten la representatividad del sistema de agua y permita de manera segura que la persona ejecute el muestreo.
Registrar la información del punto de muestreo	Después de obtener las muestras, se debe registrar en el formato de determinaciones <i>in situ</i> la información del cliente, lugar y fecha, equipos de medición, características del sitio de muestreo y sus alrededores y las observaciones a que haya lugar, incluyendo condiciones climáticas, temperatura ambiente, condiciones de monitoreo, tipo de sistema, etc.
Calibrar y/o verificar la calibración de equipos de medición	Después de registrar la información básica se debe calibrar y/o verificar la calibración de los equipos de medición de parámetros <i>in situ</i> requeridos (pH metro, conductímetro y/u oxímetro) con las soluciones patrón necesarias, que deben llevarse a la temperatura ambiente antes de ser utilizadas. Cuando los equipos han sido calibrados previamente en el Laboratorio o al inicio de la jornada, se debe solamente verificar su calibración.
Toma de Muestras análisis Microbiológico	- Ubicar el recipiente estéril con la etiqueta de análisis microbiológico y colocar en el rótulo del recipiente la identificación del punto de toma de muestra. - Sólo debe abrirse en el momento de la toma de muestra y no tocar la boca ni el interior de la tapa del recipiente para evitar contaminación. - Llenar el recipiente con la muestra dejando en la parte superior del envase un espacio de aire de por lo menos 3 cm de altura.



Acción	Detalle
	○ Tapar herméticamente el recipiente.
Toma de muestra agua	○ Colocar en el rótulo del recipiente la identificación del punto de toma de muestra ○ Sumergir el recipiente en el agua a muestrear sin ocasionar turbulencia. ○ Cuando se presentan cambios en el flujo de agua: ○ Llenar un balde con muestra ○ Llenar el recipiente con muestra hasta que quede un espacio de aire de 1 a 2 cm (flujo de agua constante y homogéneo) ○ Preservar la muestra tal como lo indica el rótulo del recipiente.
Medición de parámetros <i>in situ</i>	○ Tan pronto se toma cada muestra se deben medir los parámetros <i>in situ</i> establecidos en el plan de muestreo. ○ Las mediciones deben efectuarse lo más rápido posible (no más de 10 minutos) después de tomada la muestra siguiendo los procedimientos de análisis respectivos. ○ Registrar los resultados en el formato determinaciones de campo.
Toma de muestras para análisis hidrobiológicos	○
Diligenciar el formato de cadena de custodia	○ Una vez embaladas las muestras se diligencia la información solicitada en el formato de cadena de custodia.
Transportar las muestras al Laboratorio	○ Almacenar las muestras en una nevera de polietileno. ○ Verificar que cada nevera contenga suficientes compresas de hielo para asegurar que la refrigeración se mantenga hasta la llegada al laboratorio. (temperatura cercana a 5°C) ○ Verificar que la tapa de cada nevera quede bien cerrada y que no se salga de su sitio durante el viaje. ○ Identificar cada nevera con el logo del laboratorio y el logo de la empresa del cliente o el nombre (rótulo sale del laboratorio). E identificar con "...manipúlese con cuidado. Este lado arriba..." ○ Amarra con cinta de manera que se asegure que la nevera queda bien sellada ○ Manipular las neveras cuidadosamente, mantenerlas en posición horizontal, no golpearlas, no ubicarlas cerca de productos volátiles o corrosivos y mantenerlas alejadas de fuentes de calor. ○ El procedimiento de transporte se detalla en la Figura 4.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2022.




Figura 4. Flujograma del proceso de remisión de muestras.
Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2022.

Debe planificarse el procedimiento descrito anteriormente para asegurar su entrega oportuna al laboratorio; por ello también es necesario que las muestras se reciban oportunamente, por lo que el ingeniero de campo responsable del muestreo debe enviar la cadena de custodia para que el laboratorio asigne los códigos de identificación (ID). Las muestras son enviadas por vía aérea, para así poder asegurar que la muestra esté en el laboratorio cumpliendo con las condiciones de preservación y tiempo de almacenamiento antes del análisis.

Tabla 7. Tipo de envase y preservación.

Parámetros	Preservación	Recipiente	Tiempo Máximo
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Refrigeración < 6 °C.	Plástico, PTFE o Vidrio de orosilicato	48 horas
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Refrigeración a T < 6 °C, H ₂ SO ₄ hasta pH < 2		28 días
Sólidos Suspendidos Totales	Refrigerar 1°C y 5°C	Plástico – Vidrio	24 horas



Parámetros	Preserva	Recipiente	Tiempo Máximo
Detergentes (SAAM)	Refrigeración ≤ 6°C	Plástico, PTFE o Vidrio de Borosilicato	2 días
Ortofosfatos	Enfriar ≤ 6°C	Vidrio	48 horas
Grasas y aceites	Acidificar a pH ≤ 2 con HCl o H ₂ SO ₄ . Refrigerar a ≤ 6 °C.	Vidrio boca ancha	28 días
Hidrocarburos totales	Acidificar a pH ≤ 2 con HCl o H ₂ SO ₄ . Refrigerar a ≤ 6	Vidrio lavado con solvente usado en la extracción.	28días
Nitratos	Refrigeración < 6 °C.	Envase de vidrio	2 días
Salinidad	No requerida	Vidrio con sello de cera.	6 meses
Nitrógeno amoniacal	Acidificar a pH ≤ 2 con H ₂ SO ₄ .	Plástico – Vidrio	28 días
Metales			
Arsénico total	Adicionar HNO ₃ hasta pH < 2 y refrigeración a T < 6°C	Plástico o vidrio lavado con solución de ácido nítrico	6 meses
Cadmio total			
Cobre total			
Mercurio total			
Plomo total			
Microbiológicos			
Pseudomonas aeruginosa	Debe tener espacio de aire, refrigerar a ≤ 8 °C. Si son muestras de agua potable se debe agregar Tiosulfato de Sodio	Vidrio estéril o bolsa nasco whirl pak	24 horas
Coliformes termotolerantes	Mantener en la oscuridad y Refrigerar por debajo de 8°C	Vidrio	24 horas
Coliformes totales		Vidrio	24 horas
Hidrobiológicos			
Macrófitas			
Fitoplancton			
Zooplancton			
Peces			
Perifiton			
Macroinvertebrados bentónicos			

Fuente: American Standard Methods Ed. 23, 2017.



Tabla 8. Equipos y métodos analíticos para la medición de los parámetros *In-situ*.

Parámetro	Equipo utilizado	Método analítico	Límite de cuantificación del método	Incertidumbre como factor del método
pH	Equipo multiparámetro AZ Instruments Corp.	SM 4500 H+B	NA	±0,046
Oxígeno disuelto		ASTM D 888-18, B	NA	±0,014
Temperatura		SM 2550 B	NA	NA
Conductividad		SM 2510 B	NA	±5,047

NA: No aplica.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2022.

4.3.3. Etapa de laboratorio.

Los métodos empleados para los análisis se describen en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Listado de los métodos empleados para el análisis de las muestras.

Parámetro	Método Analítico	Límite de cuantificación	Incertidumbre como factor
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	SM-5210 B	2	0,1
Demanda Química de Oxígeno (DQO Rango bajo)	SM-5220 D	10	0,09
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	SM-2540 D	5	0,015
Detergentes (SAAM)	SM-5540 C	0,4	0,18
Ortofosfatos	S.M 4500 P, E	0,05	0,0623
Grasas y aceites	SM 5520 B Extracción liquido - liquido	10	0,0958
Hidrocarburos totales	S.M 5520 B, F	10	0,0958
Nitratos	S.M 4500 NO ₃ D, Método de electrodo selectivo	1	0,0046
Salinidad	S.M 2520 B, Método de la conductividad electrónica	ND	0,0031
Nitrógeno amoniacal	SM 4500 NH ₃ B	1	NE
Metales			
Arsénico total	EPA 200.8	0,003	NE
Cadmio total		0,003	
Cobre total		0,003	
Mercurio total		0,0004	
Plomo total		0,003	
Microbiológicos			
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SM 9213 F	1	NE
Coliformes termotolerantes	S.M Incubación tubos múltiples 9221 E	1,8	±0,40%
Coliformes totales	S.M Incubación tubos múltiples 9221 B	1,8	±0,38%

ND: No determinado, NE: No específica.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2022.



4.4 Diseño del Índice de calidad

Para la construcción del índice de calidad se tuvieron en cuenta las siguientes etapas:

- Selección de parámetros
- Desarrollo de subíndices y curvas de calidad
- Asignación de pesos a los subíndices
- Agregación de subíndices a la fórmula matemática
- Establecimiento de la escala de calidad
- Validación

4.4.1. Selección de parámetros.

Para la selección de parámetros se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Bibliográfico
- Normativo
- Análisis estadístico multivariado

4.4.1.1. Criterio bibliográfico.

Se tuvo en cuenta la revisión índices y métodos de monitoreo, de uso en diferentes países principalmente obtenidos para aguas continentales lénticas y embalses. El propósito de esta consulta fue determinar cuáles son las variables de uso más frecuente para el análisis de la calidad del agua.

4.4.1.2. Criterio Normativo.

Se tuvo en cuenta la resolución 0000449 de 2021 donde se establecen los objetivos de calidad para los cuerpos de agua en jurisdicción de la Corporación Regional Autónoma del Atlántico (CRA) con el fin de extraer las variables del objetivo asociado al embalse y el tipo de uso que actualmente tienen de acuerdo con la normativa, lo cual es esencial para determinar el enfoque del índice de calidad.



De acuerdo con estos usos, se revisaron las variables y criterios contenidos en normas nacionales como el Decreto 1594 de 1984. Además de diferentes normas internacionales, priorizando las de países tropicales.

Se contrastaron las normas y se seleccionaron las variables, teniendo en cuenta como objetivo principal la preservación de fauna y flora.

4.4.1.3. Criterio Estadístico.

Para la utilización de este criterio, se tuvo en cuenta las caracterizaciones realizadas en el embalse en diciembre de 2021 y enero de 2022, así como otros realizados desde el año 2014, realizando un análisis estadístico multivariado (ACP) para determinar las variables que ofrecen mejor explicación a la dinámica de este cuerpo de agua, así como las correlaciones más significativas y grupos de variables relacionadas con una misma condición. Las comparaciones también son analizadas a través de métodos no paramétricos como las correlaciones por rangos de Spearman, debido a que en muchos casos no logran el ajuste de la normalidad requerida por métodos paramétricos como el de Pearson.

5.3.2. Desarrollo de subíndices y curvas de calidad.

El desarrollo de las curvas de calidad se realiza asignando valores de calidad a diferentes concentraciones, teniendo en cuenta una escala de 0 a 100, siendo 100 la calidad óptima y 0 la calidad más baja. Estos valores de la escala se distribuyeron en rangos de calidad.

Las curvas de calidad y las respectivas expresiones matemáticas se obtienen a partir del software CurveExpert Profesional 2.6, seleccionando diferentes modelos, teniendo como criterio el mayor coeficiente de regresión posible, siendo preferibles los de valor cercano a 0.99.

5.3.3. Asignación de pesos a los subíndices.

Los valores en la escala para cada variable seleccionada tuvieron en cuenta los resultados del monitoreo, la normativa nacional (Dec. 1594 de 1984), los objetivos de calidad para los cuerpos de



agua de la cuenca (Res. 0000449 de 2021 de la C.R.A.) y otras normativas aplicadas a sistemas continentales de países como República Dominicana, Ecuador, Venezuela, Perú y México, entre otros, e indicadores nacionales e internacionales.

5.3.4. Agregación de subíndices a la fórmula matemática.

La agregación de los subíndices se realizó mediante una ecuación que representa de forma sencilla y objetiva el nivel de calidad que en este caso se relaciona con la preservación de la flora y la fauna, por ser el principal uso relacionado con el sistema acuático bajo estudio. Las formas de agregación son diversas con aplicaciones diferentes al igual que su sensibilidad a las variaciones en los valores de los subíndices. Básicamente existen dos formas generalizadas, por sumatoria como la media aritmética y multiplicativa como la media geométrica, cuyas expresiones son:

$$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

Media aritmética

$$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{\frac{1}{n}}$$

Media geométrica

Algunas variaciones como la ponderación de los índices se han empleado en la búsqueda de la sensibilidad adecuada. Por ejemplo, el promedio armónico no ponderado, es un método sensible a los cambios de las variables individuales, sin problemas de eclipsamiento ni ambigüedad (Dojlido *et al.*, 1994). Esta forma de agregación permite a las variables más críticas tener mayor influencia sobre el valor final del índice, lo cual es preferible a que el índice se vea más influenciado por los subíndices a los que se les otorga mayor peso (Cude, 2001). Esta forma de agregación no puede ejecutarse cuando se tienen subíndices con valor de cero, igual que sucede con la media geométrica, y puede resultar demasiado sensible a valores cercanos a cero, dando como resultado un ICA extremadamente bajo, subestimando el resto de condiciones evaluadas.

Buscando una posición objetiva, se escogió como método de agregación la media aritmética ponderada, puesto que es una de las formas más simples de agregación, originalmente propuesta por Horton (1965) y desarrollada por Brown *et al.* (1972), cuya expresión es:



$$ICA_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i SubI_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

5.3.5. Establecimiento de la escala de calidad.

Para determinar e identificar el estado ambiental de las ciénagas se estructuró una escala de valores y colores, teniendo en cuenta que la calidad óptima o excepcional de estas se acerca al valor de cien (100), mientras que la peor condición (mala calidad), para la preservación de flora y fauna se acerca a 1.

5.3.6. Validación.

Con la finalidad de comprobar el funcionamiento eficaz del índice para el embalse del Guájaro se realizó un análisis de validación empleando los datos de los monitoreos realizados para esta investigación en diferentes épocas de muestreo (lluvia y sequía).



5. NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA

○ Decreto 1076 de 2015

Artículo 2.2.3.3.9.10 Transitorio. Criterios de calidad de preservación de flora y fauna.

Parágrafo. Como criterios adicionales de calidad para los usos de que trata el presente artículo, no deben presentarse sustancias que impartan olor o sabor a los tejidos de los organismos acuáticos, ni turbiedad o color que interfieran con la actividad fotosintética.

Tabla 10. Artículo 2.2.3.3.9.10 – Decreto 1076/2015 y artículo 18 Decreto 703 de 2018

Parámetro	Expresado como	Agua fría dulce	Agua cálida dulce	Agua marina y estuarina
CloroFenoles es	CloroFenoles	0,5 CL	0,5 CL	0,5 CL
Difenil	Concentración de	0,0001 CL	0,0001 CL	0,0001 CL
Oxígeno disuelto	-	5	4	4
pH	Unidades de pH	6,5 - 9,0	4,5 - 9,0	6,5 - 8,5
Sulfuro de hidrogeno ionizado	H ₂ S	0,0002 CL	0,0002 CL	0,0002 CL
Amoniaco Total	NH ₃	0,1 CL	0,1 CL	0,1 CL
Arsénico Total	As	0,1 CL	0,1 CL	0,1 CL
Bario Total	Ba	0,1 CL	0,1 CL	0,1 CL
Berilio Total	Be	0,1 CL	0,1 CL	0,1 CL
Cadmio Total	Cd	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Cianuro libre	CN ⁻	0,05 CL	0,05 CL	0,05 CL
Cinc	Zn	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Cloro total residual	Cl ₂	0,1 CL	0,1 CL	0,1 CL
Cobre Total	Cu	0,1 CL	0,1 CL	0,1 CL
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Fenoles es monohídricos	Fenoles es	1 CL	1 CL	1 CL
Grasas y aceites	Grasas como	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Hierro Total	Fe	0,1 CL	0,1 CL	0,1 CL
Magnesio Total	Mn	0,1 CL	0,1 CL	0,1 CL
Mercurio	Hg	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Níquel Total	Ni	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Plaguicidas Organoclorados	Concentración de	0,001 CL	0,001 CL	0,001 CL
Plaguicidas organofosforados	Concentración de	0,05 CL	0,05 CL	0,05 CL
Plata Total	Ag	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Plomo Total	Pb	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Selenio Total	Se	0,01 CL	0,01 CL	0,01 CL
Tensoactivos	Sustancias activas al	0,143 CL	0,143 CL	0,143 CL

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible 2015.



Se resalta que los parámetros enlistados en el Decreto 1076 de 2015 en el artículo 2.2.3.3.9.10 y la Resolución 0000449 de 2021 de la CRA (Clase V) para la preservación de flora y fauna que están expresados en unidades de concentración letal (CL), no son comparables con las unidades reportadas por nuestro laboratorio.

● Resolución 0000449 de 2021 de la CRA

Se tuvo en cuenta los objetivos de calidad establecidos para el complejo de humedales y ciénagas de la cuenca del Canal del Dique, quienes se encuentran catalogados en Clase V, cuyos topes de calidad a corto plazo son los que se muestran en la tabla que se presenta a continuación y con uso principal de preservación de flora y fauna.

Tabla 11. Límites de control para variables fisicoquímicas en la Resolución 0000449 de 2021 de la CRA.

Parámetro	Expresado como	Valor más restringido (Máximo que se puede obtener)
Parámetros orgánicos		
DBO ₅	mg/L	70
Sólidos		
Sólidos suspendidos	mg/L	50
Parámetros de interés sanitario		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	CL 96/50	0,1
Berilio	CL 96/50	0,1
Boro	mg/L	0,3-0,4
Cadmio	CL 96/50	0,01
Zinc	CL 96/50	2
Cobalto	mg/L	0,05
Cobre	CL 96/50	0,2
Cromo (Cr+6)	mg/L	0,1
Flúor	mg/L	1
Grasas y Aceites	% de sólidos secos	Ausente
Hierro	mg/L	5
Litio	mg/L	2,5
Manganeso	mg/L	0,2
Material Flotante y Espumas		Ausente
Mercurio	mg/L	0,01



Parámetro	Expresado como	Valor más restringido (Máximo que se puede obtener)
Molibdeno	mg/L	0,01
Níquel	mg/L	0,2
Olor		Ausente
pH	Unidades	4,5-9
Plomo	mg/L	0,1
Selenio	mg/L	0,02
Vanadio	mg/L	0,1

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA. 2021.



6. RESULTADOS

El análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en aguas, se remite a la presentación de los resultados (Anexo 5. Resultados de los análisis de laboratorio).

6.1 Caracterización

6.1.1. Variables fisicoquímicas

En el embalse del Guájaro se presentaron temperaturas con valores época de lluvias (primer monitoreo – Campaña 1) entre 29.20 y 32.5 °C, y en época de lluvias (segundo monitoreo – Campaña 2) entre 30.17 y 34.40°C (**Figura 5A**). Estos valores se encuentran dentro de los promedios reportados por la CRA en años anteriores (33.84 mg/L en 2014, 31.08 mg/L en 2015, 30.02 mg/L en 2016, 33.00 mg/L en 2019 y 29°C en 2021).

Con respecto al pH, las pocas diferencias observadas podrían estar relacionadas con las condiciones de óxido-reducción producidas por la degradación de sustancias orgánicas y carbonatos, con valores entre 7.02 y 8.83 UpH en época de lluvias y 7.30 y 8.69 UpH en época seca, que cumplen con los objetivos de calidad propuestos por la CRA en la Resolución 0000449 de 2021 para la cuenca Canal del Dique (complejo de humedales y ciénagas) cuyos topes de calidad se agruparon en Clase V y tiene como uso principal la preservación de flora y fauna y del Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para preservación de flora y fauna de aguas cálidas dulces (4.5 a 9.0 UpH) (**Figura 5B**).

El oxígeno disuelto presentó valores entre 4.73 y 8.33 mg/L en época de lluvias y 5.20 y 16.10 mg/L en época seca, que pueden ser considerados apropiados para la sobrevivencia de la mayoría de las especies y que cumplen con el criterio de calidad para aguas cálidas dulces (4 mg/L) del Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (**Figura 5C**). Sin embargo, se aprecian valores en P7 (14.67 mg/L), P8 16.10 (mg/L) y P9 (13.30 mg/L) en época seca, que podrían indicar sobresaturación y que posiblemente están relacionados con la productividad fitoplanctónica obtenida en estos puntos. En general, los registros llevados por la CRA a través de los años sobre



esta variable, demuestran que es característico que se presenten valores dentro de los rangos de calidad permisible.

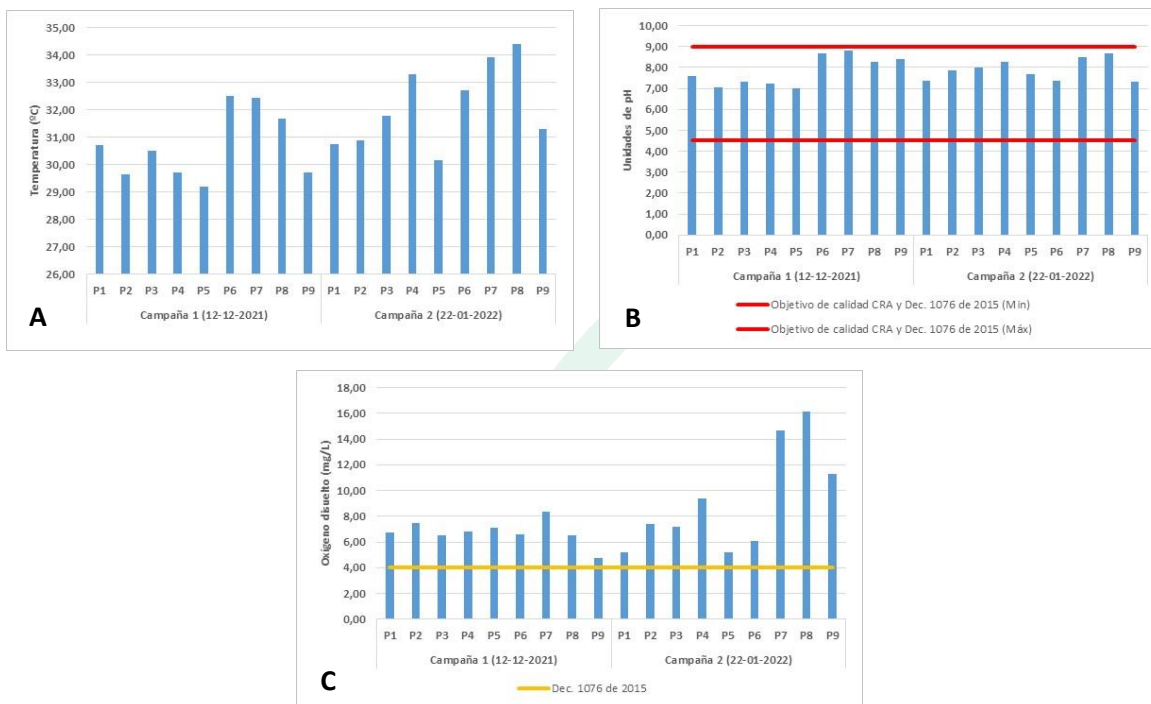


Figura 5. Variación de la temperatura, pH y oxígeno disuelto en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

En ambos monitoreos se registraron concentraciones de DBO_5 que cumplen con el criterio de calidad Clase V estipulado en la Resolución 0000449 de 2021 (70 mg/L) con uso principal en la preservación de flora y fauna (**Figura 6A**).

Aunque no se observaron concentraciones bajas de oxígeno disuelto en P9 en época seca, fue en este punto donde se presentó el valor más alto de DBO_5 (34.4 mg/L). Es importante señalar que en este lugar se observaba material vegetal en descomposición que posiblemente estaría consumiendo el oxígeno disponible en la columna de agua. En todo caso, si se comparan los resultados con las categorías de calidad establecidas en México por CONAGUA- SEMARNAT (2014), se podría decir que



en general las aguas del embalse poseen una calidad aceptable porque están dentro del rango entre >6 y ≤ 30 mg/L.

Así mismo, la DQO registró valores que, en su mayoría, según el criterio anteriormente mencionado, son característicos de aguas de calidad aceptable (>20 y ≤ 40 mg/L) o buena (>10 y ≤ 20 mg/L). Únicamente en P7 (52 mg/L) en época de lluvias y en P9 (83 mg/L) en época seca, los valores pueden considerarse como un indicador de la presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales. Es de resaltar que estos puntos se encuentran cercanos a los centros poblados de Aguada de Pablo y La Peña, respectivamente, donde eventualmente se estarían realizando descargas que aumentan la DQO (**Figura 6B**).

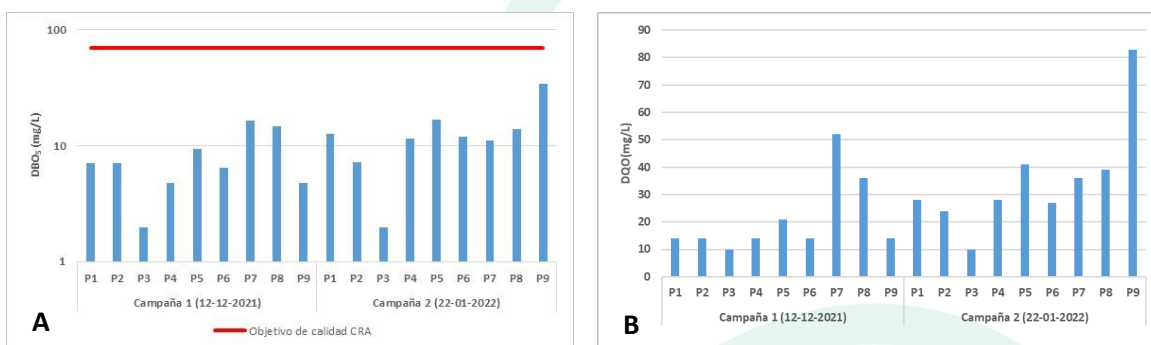


Figura 6. Variación de la DBO₅ y la DQO en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Los SST registraron concentraciones bajas entre <5.0 y 50 mg/L en época de lluvias y entre 6.0 y 55 mg/L en época seca (**Figura 7A**), que con excepción de P7 en época seca, cumplen con el objetivo de calidad Clase V estipulado en la Resolución 0000449 de 2021 (50 mg/L). Estos valores, según la escala de CONAGUA- SEMARNAT (2014) se encuentran dentro de los señalados para aguas de buena calidad (>25 y ≤ 75 mg/L) y excelente calidad (≤ 25 mg/L).

La clorofila-a es el pigmento común a todos los organismos productores primarios y tiene relación directa con la productividad primaria y el desarrollo vegetal. Se presentaron concentraciones entre 0.395 y 15.3 mg/L en época de lluvias y <0.20 en todos los puntos en época seca (**Figura 7B**).



Contrario a lo esperado, esta registró valores más altos en época de lluvias, mostrando una relación inversa con densidades de fitoplancton entre monitoreos, lo que se puede deber a que esta no solo depende de la cantidad de fitoplancton sino de diferentes factores, entre ellos la concentración de nutrientes (fósforo y nitrógeno), penetración de la luz y temperatura del agua.

De otro lado, se observó menor transparencia en época de lluvias con valores ≤ 35 cm (**Figura 7C**). Los registros están fuertemente relacionados con la época climática. Durante las lluvias, es habitual que haya una resuspensión de sedimentos desde el fondo y entren otros por escorrentías, que ayudan a disminuir la entrada de luz en la columna de agua. También se observa una fuerte relación de esta variable con las concentraciones de clorofila-a y SST, principalmente en época de lluvias, donde se les observa el mismo comportamiento en la gráfica, en tanto, en época seca, donde ya el agua pierde algo de movilidad, los valores de esta variable se mantienen casi que constantes en todo el embalse y un poco más altos (≥ 50 cm).

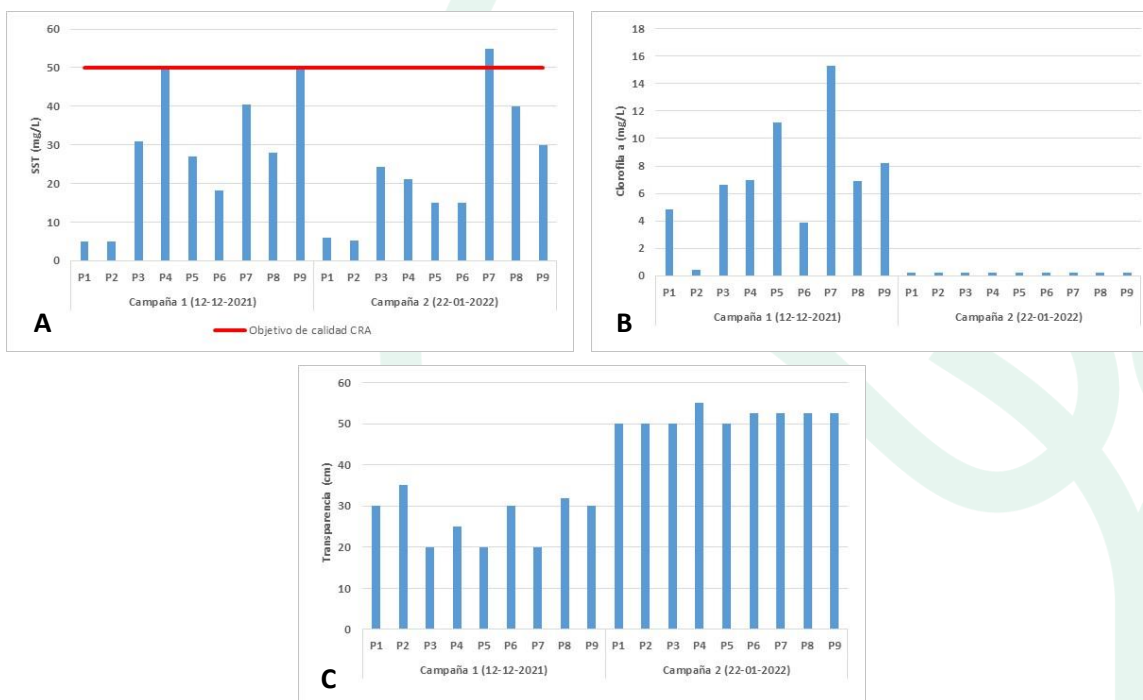


Figura 7. Variación de los sólidos suspendidos totales (SST), clorofila-a y la transparencia en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



La conductividad registró concentraciones de P1 a P3 <500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ > P4 a P9 en época de lluvias y en P1, P2 y P4 <500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ > P3, P5 a P9 en época seca (

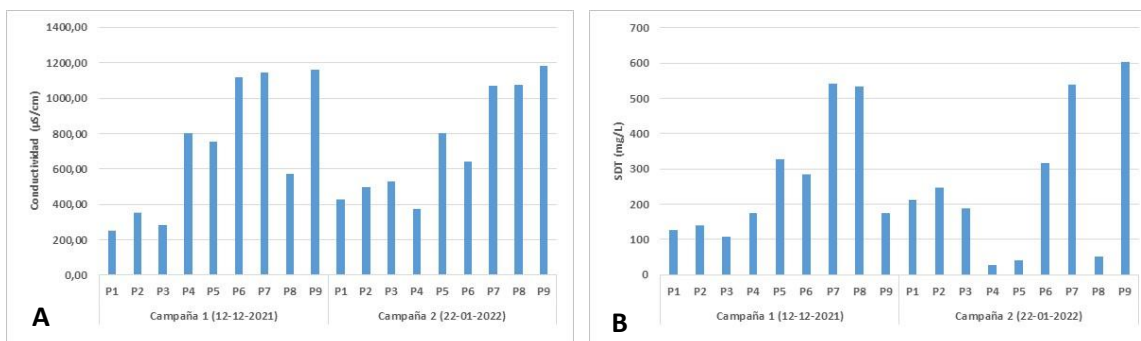


Figura 8A). Con respecto a esta variable, Cirujano (1995), considera que las aguas dulces no superan valores de alrededor de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y Roldan (1992), que en promedio, poseen menos de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Asimismo, Roldán y Ramírez (2008), indican que en aguas continentales fuertemente mineralizadas se pueden presentar valores entre 500 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El valor de la conductividad eléctrica es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos (SDT), por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración de sólidos disueltos en el agua, mayor será la conductividad y viceversa (Zúñiga et al., 2016). En los monitoreos realizados esta regla no es la excepción, los SDT presentaron el mismo comportamiento gráfico que la conductividad, registrándose valores entre 107.5 y 541.3 mg/L en época de lluvias y entre 26 y 538.5 en época seca

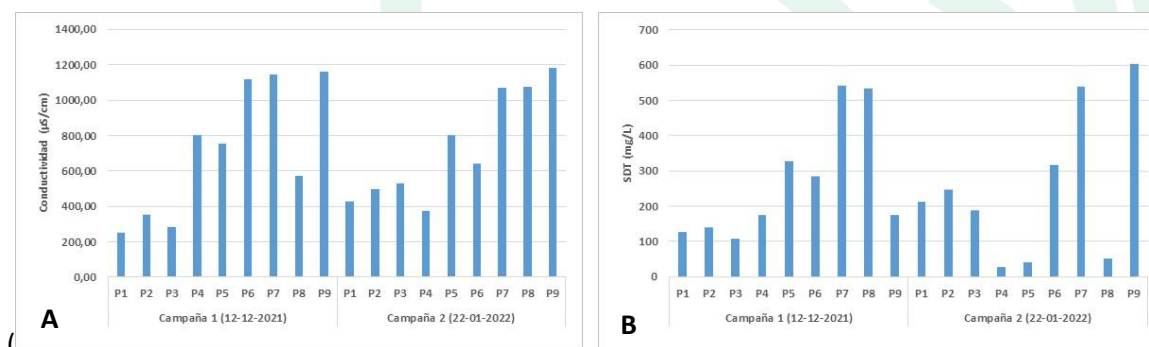


Figura 8B). Espinoza (2005), menciona que en general, las aguas que contienen menos de 500 mg/L de sólidos disueltos totales, como ocurre en la mayoría de registros de esta variable, son aptas para usos domésticos e industriales.

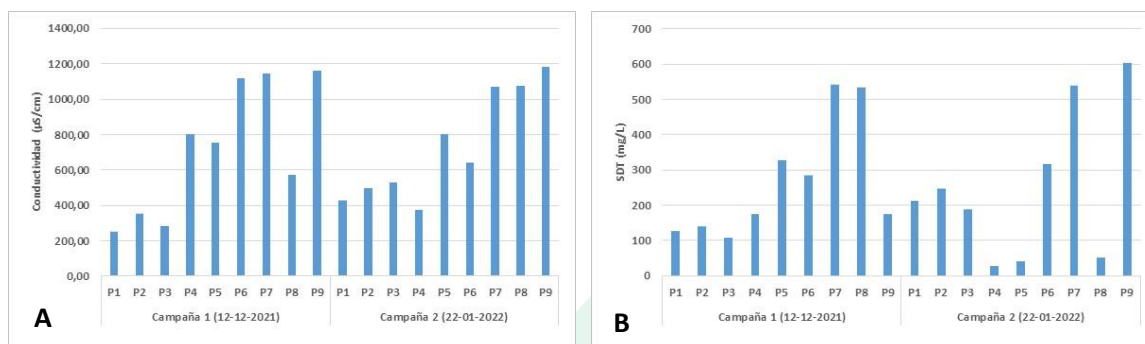


Figura 8. Variación de la conductividad y los sólidos disueltos totales (SDT) en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Los registros de dureza cálcica muestran que, en el embalse, en la época de lluvias, se presentaron concentraciones <60 mg/L, al igual que de P1 a P6 en época seca. En esta última, de P7 a P9 se registraron valores entre 63 y 72 mg/L (**Figura 9A**). Los resultados obtenidos muestran que, en la mayoría de puntos, en ambos muestreos, el embalse tiene aguas de características blandas (inferiores a 60 mg/L de CaCO₃) y solo en los puntos P7 a P9 en época seca, características de aguas medianamente duras (entre 61 y 120 mg/L de CaCO₃), que según la clasificación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en Rodríguez-Zamora (2009), no representan riesgo para la vida acuática.

De otro lado, la dureza total estuvo representada por valores entre 82.4 y 208.8 mg/L en época de lluvias y entre 97.4 y 189.7 mg/L en época seca (**Figura 9B**). Los valores más altos en ambos monitores se registraron en P8, lo que sugiere que en esta zona se encuentran formaciones geológicas carbonatadas. Al observar los resultados de dureza total y comparados con los de dureza cálcica, se podría decir que en época seca el mayor porcentaje de esta está representado en sales de calcio y magnesio.



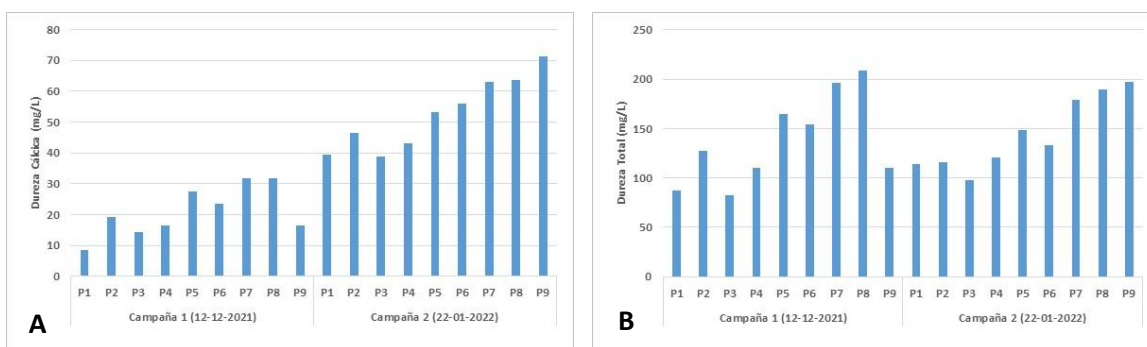


Figura 9. Variación de la dureza cálcica y dureza total en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Para los ortofosfatos (PO_4) registraron concentraciones entre <0.050 y 0.21 mg/L en época de lluvias y entre 0.17 y 0.39 mg/L en época seca (**Figura 10A**). Los resultados demuestran que este cuerpo de agua puede considerarse como eutrofizado, de acuerdo a lo expuesto por Ramírez et al. (1999), quien menciona que valores por encima de $0,01$ mg/L de PO_4 son propios de aguas contaminadas.

La producción de fosfatos se inicia en la mineralización de la materia orgánica presente en los sedimentos, es decir, se liberan fosfatos al descomponerse dicha materia. También se puede dar la liberación de fosfatos en las capas superficiales del humedal antes de la sedimentación. La eutrofización ocurre cuando se tienen grandes cantidades de materia orgánica en los sedimentos que provocan exorbitantes concentraciones de fosfatos, los cuales en exceso son tóxicos para los organismos y plantas presentes. Así mismo, estos los liberan en la excreción y suministran grandes cantidades de fosfatos al agua, contaminándola (Roldán y Ramírez, 2008).

Por su parte, el fósforo total presentó concentraciones entre <0.050 y 0.6 mg/L en época de lluvias y entre 0.23 y 0.61 mg/L en época seca (**Figura 10B**). Teniendo en cuenta que el límite para aguas no contaminadas para el fósforo total es de 0.005 mg/L según Wetzel (1981), se puede afirmar que únicamente en los puntos P4 y P9 donde se registraron concentraciones por debajo del límite de detección del método empleado (0.005 mg/L), en el resto del embalse, en ambos monitoreos, hay contaminación por este nutriente. El enriquecimiento por nutrientes, principalmente fosfatos y nitratos, conlleva a la eutrofización de los cuerpos de agua.



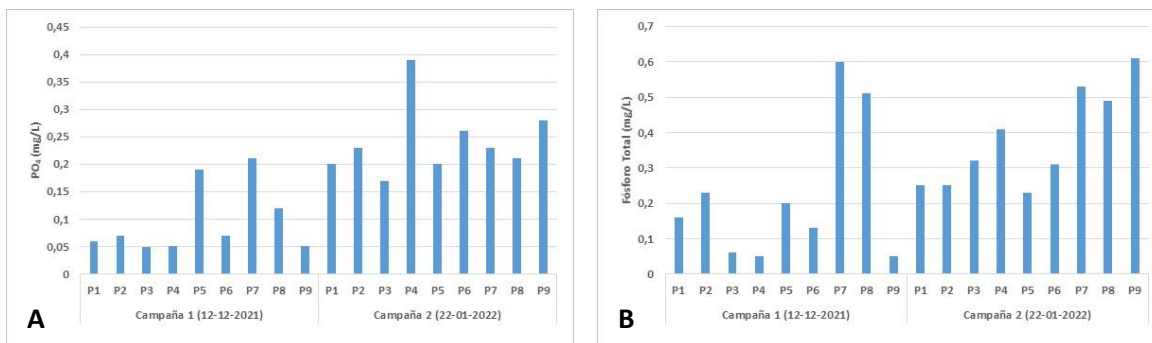


Figura 10. Variación de los fosfatos y el fósforo total en el Embalse del Guájaró.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

En el caso de los sulfuros (S_2), no se obtuvieron concentraciones detectables con el método empleado (<0.85 mg/L), mientras que los sulfatos registraron concentraciones no detectables (<10 mg/L) en P1, P2 y P3, en ambos monitoreos. De P4 a P9 se obtuvieron valores entre 13 y 14 mg/L en época de lluvias y entre 44 y 119 en época seca (**Figura 11**).

Es probable que en los puntos del embalse más al norte (P4 a P9), el suelo este compuesto por formaciones rocosas de yeso y superficies sulfatadas que son llevados hasta la columna de agua por escorrentías, o se puedan estar generando por el lavado de sales añadidas en actividades agrícolas.

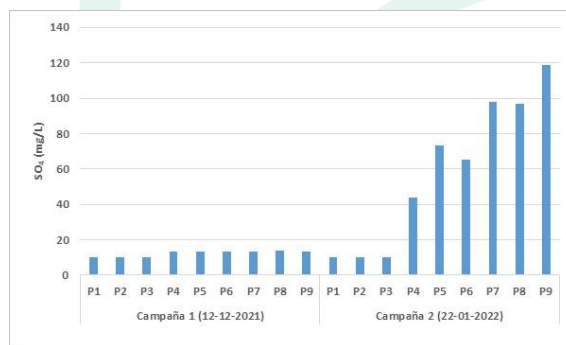


Figura 11. Variación de los sulfatos en el Embalse del Guájaró.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Los niveles de nitratos y nitritos en aguas naturales son un indicador importante de la calidad del agua. Ambos se encuentran relacionados con el ciclo del nitrógeno de suelo y plantas superiores,



aunque los nitratos son añadidos por medio de fertilizantes que puede ocasionar que los niveles de estos aumenten. Los nitritos también se forman durante la biodegradación de nitratos, nitrógeno amoniacal u otros compuestos orgánicos nitrogenados y se utiliza como indicador de contaminación fecal en aguas naturales (Cabrera et al., 2003).

En el embalse, los registros de nitratos (NO_3) no constituyen problemas para la calidad del agua debido a que se presentaron concentraciones muy bajas en todos los puntos, en ambos monitoreos (**Figura 12A**). Por su parte, los nitritos (NO_2), que presentaron valores entre 0.083 y 0.556 mg/L en época de lluvias y <0.005 y 0,125 mg/L en época seca podrían estar indicando contaminación, principalmente en época de lluvias (todo el embalse) y en P9 en época seca (**Figura 12B**).

En aguas superficiales bien oxigenadas, los nitritos (NO_2), no suelen superar 0.1 mg/L (Marín, 1995). Según Ericson (1984) valores entre 0.1 y 0.9 mg/L pueden presentar problemas de toxicidad dependiendo del pH, asimismo, valores por encima de 1 mg/L son totalmente tóxicos y representan un problema para el desarrollo de la vida piscícola. En general, la concentración de nitritos en el agua superficial es muy baja, pero puede aparecer ocasionalmente en concentraciones inesperadamente altas debido a la contaminación industrial y de aguas residuales domésticas (Prat et al., 1999).

De otro lado, el amoníaco (NH_3) presentó, en época de lluvias, concentraciones por debajo del límite de detección (<0.2 mg/L) y en época seca de <0.2 a 0.2 mg/L en época seca (**Figura 12C**). US EPA (1999, 2006), EEA (2000, 2005), Environment Canadá (2001) y Alonso (2005) han recomendado concentraciones máximas dentro del rango 0,05-0,35 mg/L NH_3 durante exposiciones de corta duración, y concentraciones máximas dentro del rango 0,004-0,02 mg/L NH_3 durante exposiciones de larga duración, para proteger a las especies más sensibles de la toxicidad del amoníaco. Los ambientes acuáticos sin contaminar contienen pequeñas cantidades de nitrógeno amoniacal, generalmente menores a 0.1 mg/L, pero pueden alcanzar de 2 a 3 mg/L, y concentraciones más altas pueden indicar que existe contaminación de origen orgánico procedente de aguas residuales (Sierra-Ramírez, 2011).



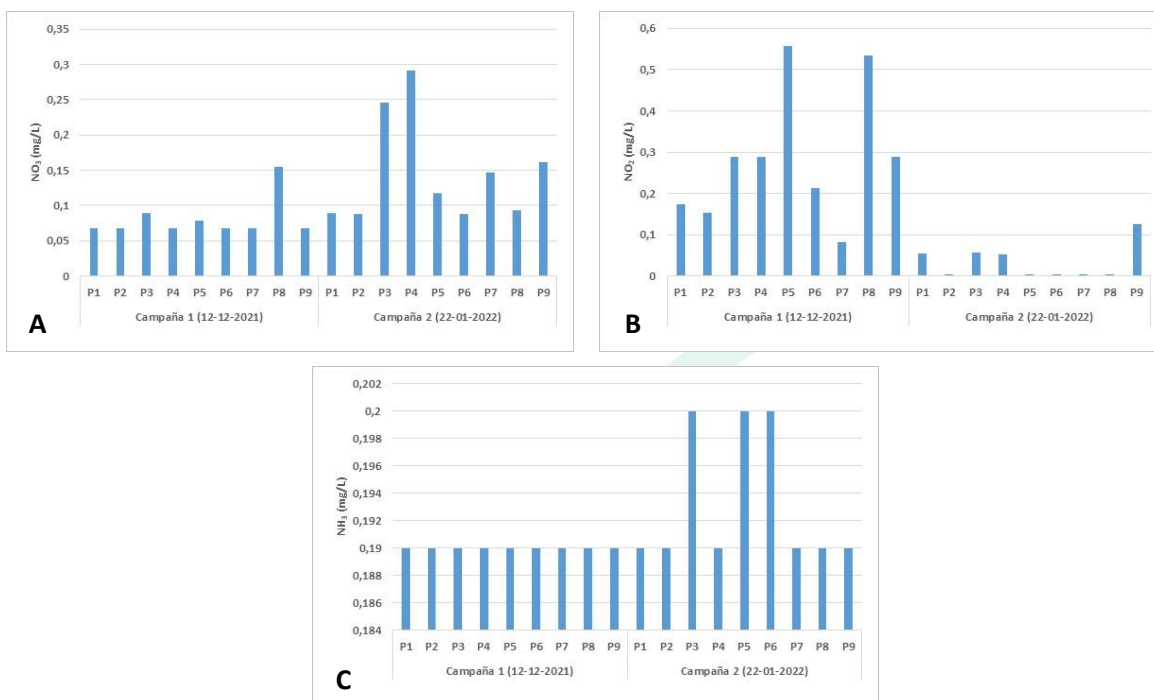


Figura 12. Variación de los nitratos, nitritos y el amoniaco en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Las grasas y aceites (GyA) registraron, en todos los puntos, concentraciones por debajo del límite de detección del método empleado ($<10 \text{ mg/L}$), al igual que los hidrocarburos totales del petróleo (HTP) ($<10 \text{ mg/L}$) y los detergentes (SAAM) ($<0.40 \text{ mg/L}$).

Por otra parte, como se mencionó en la metodología, los parámetros enlistados en el Decreto 1076 de 2015 en el artículo 2.2.3.3.9.10 y la Resolución 0000449 de 2021 de la CRA (Clase V) para la preservación de flora y fauna que están expresados en unidades de concentración letal (CL), no son comparables con las unidades reportadas por nuestro laboratorio. Sin embargo, solo por hacer un estimativo de las cargas de metales pesados en el agua se grafican estas concentraciones.

Fueron registradas bajas concentraciones de Arsénico (As) y Cobre (Cu) que si se comparan con las CL de control de la Resolución 0000449 de 2021 de la CRA (Clase V) y el Decreto 1076 de 2015, se



encuentran muy por debajo de los límites de preocupación. En tanto, el Plomo, que también registró bajas concentraciones en casi todos los monitoreos, en P2 en época de lluvias, presentó 0.024 mg/L que supera el límite permitido por la CRA en la Resolución 0000449 de 2021 (Clase V) (0.01 mg/L) (**Figura 13**). Este valor de Pb podría estar relacionado con la entrada de agua de escorrentía que pasan por tierras calizas y minas de materiales de construcción que hay en la zona. Por su parte, el cadmio (Cd) y el mercurio (Hg) reportaron concentraciones por debajo del límite de detección del método en todos los puntos muestreados.



Figura 13. Variación del arsénico, cobre y plomo en el Embalse del Guájaro.
 Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

6.1.2. Variables Microbiológicas.

Los CTE registraron valores entre 78 NMP/100 mL (P7) y 790 NMP/100 mL (P2) en época de lluvias y de 450 NMP/100 mL (P3) y 9400 NMP/100 mL (P4) en época seca, mientras que los CT estuvieron entre 78 NMP/100 mL (P7) y 14000 NMP/100 mL (P5) en época de lluvias y de 1300 NMP/100 mL (P3) y 92000 NMP/100 mL (P4) en época seca (**Figura 14A y Figura 14B**).



En general, los registros demuestran baja concentración por CTE y CT en época de lluvias, excepto para los CT en P5. La contaminación en este punto es razonable por su cercanía al municipio de Repelón, donde se descargan aguas residuales municipales sin tratamiento hacia el embalse.

En época seca sucede lo contrario, a excepción de P3, tanto para CTE como para CT, las concentraciones de estos microorganismos son altas debido a que la columna de agua se encuentra en disminución y con poco movimiento, aumentando la actividad de microorganismos.

De los microorganismos patógenos, los análisis de *Pseudomonas* en el agua del embalse mostraron altos valores únicamente en P6 y P7 (1600 NMP/100 mL cada uno) en época seca (**Figura 14C**). Estas bacterias no se consideran autóctonas del agua y tienen origen en las heces humanas y animales, su detección en agua se asocia con contaminación por descarga de aguas residuales, por lo tanto, hay una estrecha correlación de su presencia en ambientes acuáticos con fenómenos de contaminación (De Vicente et al. 1991).

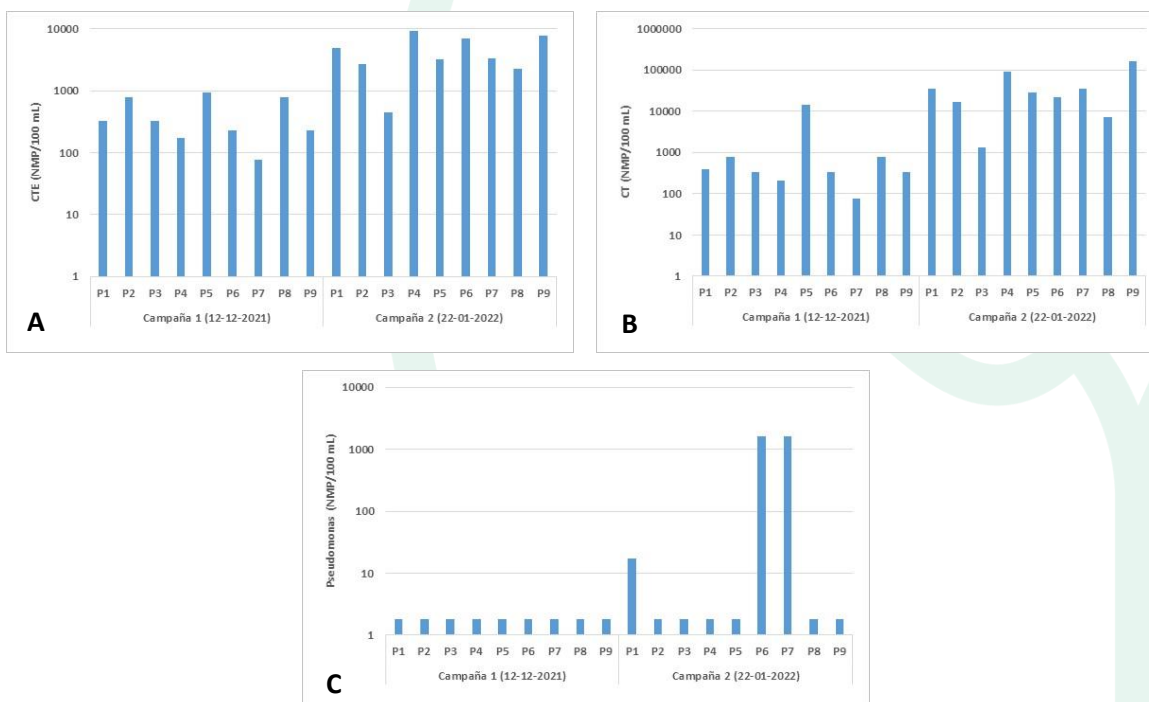


Figura 14. Variación de coliformes termotolerantes (CTE), coliformes totales (CT) y *Pseudomonas* en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

6.1.3. Variables Hidrobiológicas.

6.1.3.1. Fitoplancton.

La comunidad fitoplanctónica del Embalse del Guájaro estuvo conformada por 35 morfoespecies distribuidas en seis (6) Divisiones, nueve (9) clases, 17 órdenes y 24 familias, cuya clasificación taxonómica se encuentra relacionada en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Clasificación taxonómica de las morfoespecies del fitoplancton observadas en el Embalse del Guájaro.

Phylum o División	Clase	Orden	Familia	Morfoespecie
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	<i>Nitzschia sp1</i>
		Cymbellales	Gomphonemataceae	<i>Gomphonema sp1</i>
		Eunotiales	Eunotiaceae	<i>Eunotia sp1</i> <i>Eunotia sp3</i>
		Fragilariales	Fragilariaceae	<i>Fragilaria sp1</i>
		Surirellales	Surirellaceae	<i>Surirella sp1</i>
	Coscinodiscophyceae	Aulacoseirales	Aulacoseiraceae	<i>Aulacoseira sp</i>
	Mediophyceae	Stephanodiscals	Stephanodiscaceae	<i>Cyclotella sp</i>
Ochrophyta	Xanthophyceae	Mischococcales	Sciadiaceae	<i>Centrtractus sp1</i> <i>Centrtractus sp2</i>
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Chroococcales	Chroococcaceae	<i>Aphanocapsa sp1</i>
			Gomphosphaeriaceae	<i>Gomphosphaeria sp</i>
			Microcystaceae	<i>Microcystis sp</i>
		Nostocales	Aphanizomenonaceae	<i>Oscillatoria sp2</i> <i>Raphidiopsis sp 1</i>
			Nostocaceae	<i>Anabaena sp2</i>
			Microcoleaceae	<i>Arthrospira sp</i>
		Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Oscillatoria sp3</i> <i>Oscillatoria sp4</i>
				<i>Cosmarium sp1</i>
Charophyta	Conjugatophyceae	Desmidiiales	Desmidiaceae	<i>Micrasterias laticeps</i>
Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Volvocaceae	<i>Eudorina sp</i> <i>Pandorina morum</i>
		Oedogoniales	Oedogoniaceae	<i>Oedogonium sp1</i>
		Sphaeropleales	Hydrodictyaceae	<i>Pediastrum duplex</i>
			Scenedesmaceae	<i>Coelastrum sp1</i>
	Trebouxiophyceae	Chlorellales	Chlorellaceae	<i>Chlorella sp</i>



Phylum o División	Clase	Orden	Familia	Morfoespecie
			Oocystaceae	<i>Lagerheimia sp</i> <i>Oocystis sp</i>
Euglenozoa	Euglenophyceae	Euglenales	Euglenaceae	<i>Euglena sp1</i> <i>Euglena sp4</i> <i>Strombomona sp</i>
				<i>Lepocinclis acus</i>
			Phacaceae	<i>Lepocinclis ovum</i>
				<i>Lepocinclis sp</i>

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La División Cyanobacteria presentó la mayor riqueza, con nueve (9) morfoespecies, lo que representó un aporte del 25,7%, seguido de Bacillariophyta y Chlorophyta con ocho (8) morfoespecies cada una, lo que correspondió a un aporte del 22,9% por cada taxón; seguidas de las Euglenozoa con seis (6) morfoespecies, equivalente a 17,1%, y con el menor número de morfoespecies las Divisiones Charophyta y Ochrophyta con tan solo dos (2) morfoespecies cada una (5,7%).

Por su parte las mayores contribuciones a la densidad, fueron hechas por la División Cyanobacteria con un aporte total del 887270 Ind/L, lo que representó un 94,45% de los individuos colectados. La importancia ecológica de las cianobacterias o algas verde azules radica en su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, lo que permite aporte de compuestos nitrogenados a los cuerpos de agua; también son conocidas por su crecimiento en cuerpos de agua eutrofizados y en zonas con presencia de fuentes de nutrientes o vertimientos, siendo un caso muy particular que por factores ambientales tales como el aporte desmedido de nutrientes de las descargas cloacales y de fertilizantes, ocurren floraciones de algunas especies, las cuales pueden producir toxinas, entre las que se destacan las cianotoxinas y biotoxinas, capaces de producir gastroenteritis, respuestas alérgicas e incluso la muerte de vertebrados acuáticos y terrestres (ganado vacuno, ovino, canino equino y porcino) e incluso de humanos (Chorus y Bartram, Eds, 1999).

Le siguieron en contribución a la densidad los taxones de la División Bacillariophyta, con un aporte total de 47630 Ind/cm², correspondiente a un 5,07% de la abundancia total. La importancia



ecológica de las diatomeas radica en varios puntos, el primero, Las diatomeas son las microalgas más abundantes en prácticamente todos los ecosistemas acuáticos, segundo las especies de diatomeas están estrechamente vinculadas a las características químicas de las aguas donde viven, creciendo en rangos particulares de variables ambientales, como pH, salinidad, concentración de nutrientes, sedimentos en suspensión por eso son utilizadas en la evaluación y monitoreo ambiental, Finalmente su cubierta celular silíceo no se descompone, por lo que las diatomeas de sedimentos pueden ser utilizadas para interpretar las condiciones pasadas (Liukkonen et al., 1997; Gabito et al., 2013). Las Divisiones restantes Chlorophyta, Euglenozoa, Ochrophyta y Charophyta contribuyeron muy poco a la densidad con aportes del 0,37, 0,007, 0,039 y 0,004% respectivamente, como se observa en la **Figura 15A**. Al ser contrastado con el monitoreo realizado en el 2021 (**Figura 15B**), se evidencia un comportamiento similar, gran proporción de contribución de las Cianobacterias, seguido de las bacilariofitas, con excepción de la presencia de representantes de la División Ochrophyta durante el año 2022.

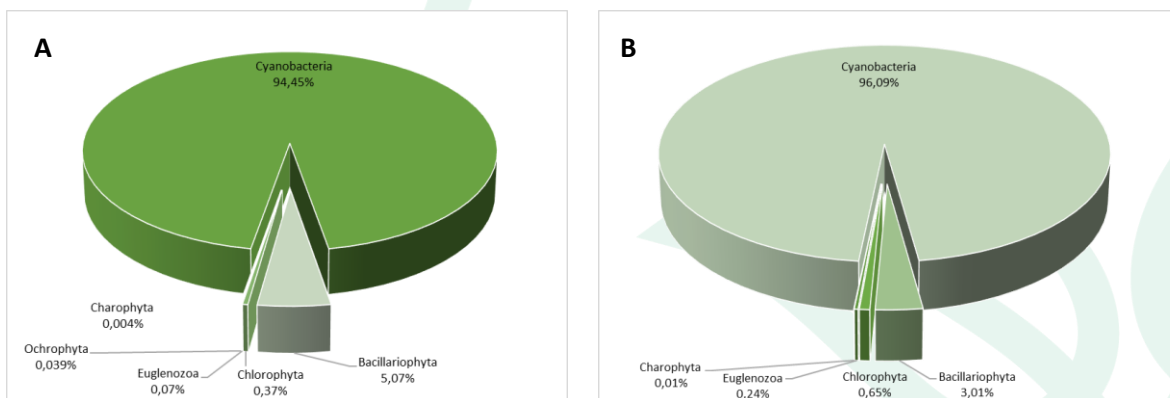


Figura 15. Contribución porcentual de las Divisiones fitoplanctónicas a la densidad total en el Embalse del Guájaro A) año 2022 y B) año 2021.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La distribución espacial de las morfoespecies (**Figura 16**) demostró fluctuaciones marcadas entre los Puntos 1 al 5 y los Puntos 6 al 9. En los primeros se observaron riquezas medias a altas, tales como ocho (8) morfoespecies en el Punto 5 y 18 morfoespecies en el Punto 2; mientras que, para los puntos 6 al 9, la riqueza fluctuó entre dos (2) morfoespecies, en el Punto 7 y 10 morfoespecies en el Punto 9. Igualmente, la densidad de la zona entre los Puntos 1 y 5 fue menor, fluctuando entre



14330 Ind/L en el Punto 4 y 30600 Ind/L en el Punto 5; mientras que en los Puntos 6 al 9, fue mayor, fluctuando entre 155960 Ind/L en el Punto 9 y 274020 Ind/L en el Punto 8. La comparación histórica contrasta que en el año 2021 se observaron menos morfoespecies en los Puntos 2 al 6, mientras que en los Puntos 1, 7, 8 y 9 fue mayor; igualmente la densidad presentó un comportamiento similar en los dos años, con excepción del Punto 6, donde se presentó un incremento para el año 2022.

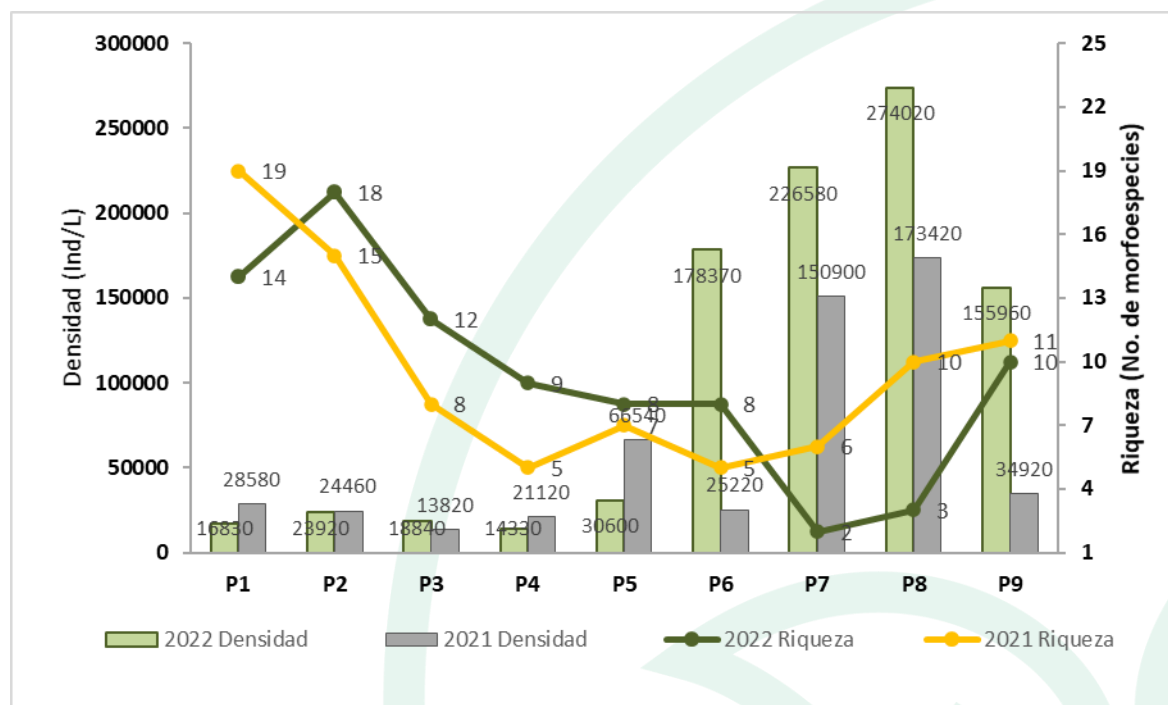


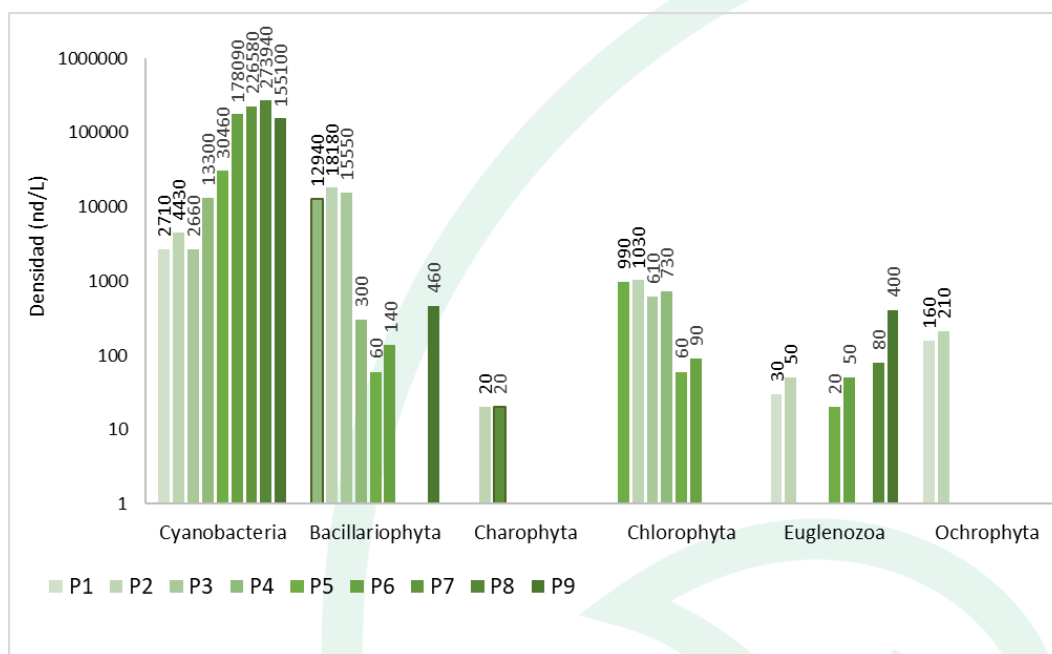
Figura 16. Densidad (Ind/cm²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad fitoplanctónica en el Embalse del Guájaro, contrastando con el monitoreo del año 2021

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La distribución espacial de los taxones mayores permitió evidenciar el predominio de las cianobacterias en todos los puntos de muestreo, siendo de presencia exclusiva en el Punto 7 (**Figura 17A**), mientras que en los Puntos 8 y 9 reportaron el 99,97 y 99,45% de la abundancia total, en el primer de estos puntos estuvieron acompañadas por representantes de la división Euglenozoa (80 Ind/L, 0,03%) y en el segundo por bacilariofitas (460 Ind/L, 0,29%) y euglenozoos (400 Ind/L, 0,26%). Su aporte en los Puntos 4, 5 y 6 también superó el 90% de la densidad total (92,8, 99,5 y 99,8% respectivamente), con la presencia de Bacillariophyta (2,1, 0,2 y 0,08% respectivamente) y



Chlorophyta (5,1, 0,2 y 0,05% respectivamente) en los tres puntos, incluyendo los representantes de Euglenozoa en el Punto 5 (20 Ind/L, 0,07%) y el Punto 6 (50 Ind/L, 0,03%). En los Puntos 1 al 3, la división Bacillariophyta fue la predominante, con densidades de 12904 Ind/L (76,9%), 18180 (76%) y 15550 (82,5%) respectivamente. Al realizar un análisis histórico se evidencia un comportamiento similar en la distribución de la densidad de las Divisiones taxonómicas como se evidencia en la **Figura 17B**.



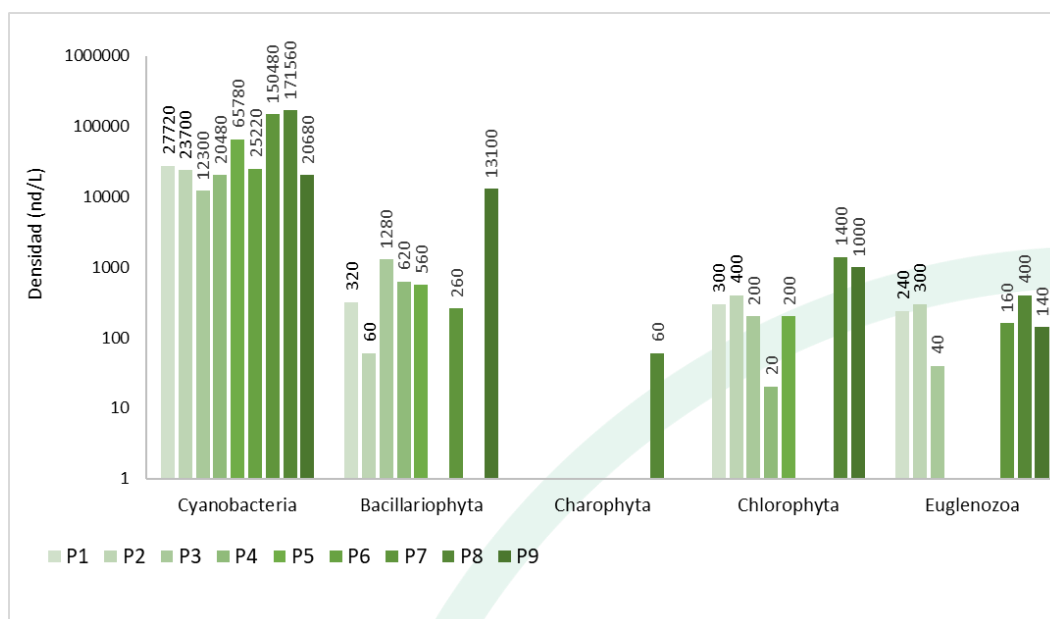


Figura 17. Densidad (Ind/cm²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad fitoplanctónica en el Embalse del Guájaro A) Año 2022 B) Año 2021.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La Morfoespecie más abundante fue *Microcystis* sp, para la cual se reportó una densidad total de 830750 Ind/L, con densidades máximas en los Puntos 6 (177160 Ind/L, 99,23%), Punto 7 (225820 Ind/L, 99,66%), Punto 8 (273660 Ind/L, 99,87%) y el Punto 9 (152060 Ind/L, 97,50%). *Aphanocapsa* sp1 fue la segunda Morfoespecie de mayor densidad con un total de 35390 Ind/L, siendo mayor en los Puntos 4 (9650 Ind/L, 67,34%) y 5 (23970 Ind/L, 78,33%), mientras que *Aulacoseira* sp ocupó el tercer lugar con una densidad total de 34030 Ind/L, con las mayores abundancias en el Punto 1 (12940 Ind/L, 76,89%) y el Punto 2 (17360 Ind/L, 72,58%), como se observa en la **Tabla 13** y **Tabla 14**.

Tabla 13. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies del fitoplancton en Embalse del Guájaro.

Morfoespecie	Densidad (Ind/L)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Nitzschia</i> sp1	0	110	1650	0	0	60	0	0	0
<i>Gomphonema</i> sp1	0	40	2440	0	0	0	0	0	80
<i>Eunotia</i> sp1	0	30	220	0	0	0	0	0	0
<i>Eunotia</i> sp3	0	0	0	0	0	50	0	0	0



Morfoespecie	Densidad (Ind/L)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Fragilaria sp1</i>	0	640	7680	190	0	0	0	0	0
<i>Surirella sp1</i>	0	0	0	0	0	30	0	0	0
<i>Aulacoseira sp</i>	12940	17360	3560	110	60	0	0	0	0
<i>Cyclotella sp</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	380
<i>Cosmarium sp1</i>	0	20	0	0	0	0	0	0	0
<i>Micrasterias laticeps</i>	0	0	20	0	0	0	0	0	0
<i>Eudorina sp</i>	0	160	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pandorina morum</i>	0	0	0	20	30	0	0	0	0
<i>Oedogonium sp1</i>	0	0	30	0	0	0	0	0	0
<i>Pedriastrum duplex</i>	0	0	0	20	30	0	0	0	0
<i>Coelastrum sp1</i>	40	30	0	30	0	0	0	0	0
<i>Chlorella sp</i>	910	430	580	660	0	40	0	0	0
<i>Lagerheimia sp</i>	40	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oocystis sp</i>	0	410	0	0	0	50	0	0	0
<i>Aphanocapsa sp1</i>	770	690	310	9650	23970	0	0	0	0
<i>Gomphosphaeria sp</i>	210	1660	1750	180	100	0	0	0	0
<i>Microcystis sp</i>	0	1470	580	0	0	177160	225820	273660	152060
<i>Oscillatoria sp2</i>	0	0	0	0	30	0	0	0	0
<i>Raphidiopsis sp 1</i>	1510	0	0	0	0	0	0	0	2880
<i>Anabaena sp2</i>	30	0	20	3470	0	930	0	0	100
<i>Arthrospira sp</i>	130	0	0	0	0	0	0	0	60
<i>Oscillatoria sp3</i>	60	140	0	0	0	0	0	0	0
<i>Oscillatoria sp4</i>	0	470	0	0	6360	0	760	280	0
<i>Euglena sp1</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	60
<i>Euglena sp4</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	40
<i>Strombomona sp</i>	0	0	0	0	20	0	0	0	0
<i>Lepocinclis acus</i>	10	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Lepocinclis ovum</i>	0	0	0	0	0	50	0	80	240
<i>Lepocinclis sp</i>	20	50	0	0	0	0	0	0	60
<i>Centritractus sp1</i>	130	90	0	0	0	0	0	0	0
<i>Centritractus sp2</i>	30	120	0	0	0	0	0	0	0
Densidad Total (Ind/L)	16830	23920	18840	14330	30600	178370	226580	274020	155960

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Tabla 14. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies del fitoplancton en Embalse del Guájaro.

Morfoespecie	Abundancia relativa (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Nitzschia sp1</i>	0,00	0,46	8,76	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
<i>Gomphonema sp1</i>	0,00	0,17	12,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
<i>Eunotia sp1</i>	0,00	0,13	1,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Eunotia sp3</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
<i>Fragilaria sp1</i>	0,00	2,68	40,76	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Surirella sp1</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00



Morfoespecie	Abundancia relativa (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Aulacoseira sp</i>	76,89	72,58	18,90	0,77	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Cyclotella sp</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24
<i>Cosmarium sp1</i>	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Micrasterias laticeps</i>	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Eudorina sp</i>	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Pandorina morum</i>	0,00	0,00	0,00	0,14	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Oedogonium sp1</i>	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Pediastrum duplex</i>	0,00	0,00	0,00	0,14	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Coelastrum sp1</i>	0,24	0,13	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Chlorella sp</i>	5,41	1,80	3,08	4,61	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
<i>Lagerheimia sp</i>	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Oocystis sp</i>	0,00	1,71	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
<i>Aphanocapsa sp1</i>	4,58	2,88	1,65	67,34	78,33	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Gomphosphaeria sp</i>	1,25	6,94	9,29	1,26	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Microcystis sp</i>	0,00	6,15	3,08	0,00	0,00	99,32	99,66	99,87	97,50
<i>Oscillatoria sp2</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Raphidiopsis sp 1</i>	8,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,85
<i>Anabaena sp2</i>	0,18	0,00	0,11	24,21	0,00	0,52	0,00	0,00	0,06
<i>Arthrospira sp</i>	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
<i>Oscillatoria sp3</i>	0,36	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Oscillatoria sp4</i>	0,00	1,96	0,00	0,00	20,78	0,00	0,34	0,10	0,00
<i>Euglena sp1</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
<i>Euglena sp4</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
<i>Strombomona sp</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Lepocinclis acus</i>	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Lepocinclis ovum</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03	0,15
<i>Lepocinclis sp</i>	0,12	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
<i>Centritractus sp1</i>	0,77	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Centritractus sp2</i>	0,18	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La revisión histórica pone en evidencia que el predominio de *Microcystis* sp ocurrió también el en año 2021, con una densidad total de 406280 Ind/L, seguido de *Planktothrix* sp (55540 Ind/L) y *Raphidiopsis* sp 1 (19960 Ind/L) (**Tabla 15**). Igualmente, la distribución espacial indicó el predominio de *Microcystis* sp en los puntos 4 (14620 Ind/L, 69,2%), 5 (59420 Ind/L, 89,3%), 6 (19980 Ind/L, 79,2%), 7 (145520 Ind/L, 96,4%) y 8 (165420 Ind/L, 95,4%) (**Tabla 16**). Lo que pone en evidencia que espacialmente, el sector entre los Puntos 5 y 9 parecen presentar condiciones que fomentan el desarrollo de esa morfoespecie, convirtiéndose en un punto crítico para el seguimiento y control de



del Embalse, ya que en estas zonas es más probable la aparición de afloramientos de esta especie con cepas que contengan cianotoxinas.

Tabla 15. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies del fitoplancton en Embalse del Guájaro.

Morfoespecie	Densidad (Ind/L)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Anabaena sp2</i>	2100				4780		2100	640	1280
<i>Planktothrix sp</i>	17400	12900	6140	2320	820	1680	1520	2740	10020
<i>Raphidiopsis sp 1</i>	4640	1880	2800	3540	760	2260	1340	2740	
<i>Oscillatoria sp3</i>	1320	3060	1700			820			9260
<i>Gomphosphaeria sp</i>	2180	5860	360			480			
<i>Microcystis sp</i>			1300	14620	59420	19980	145520	165440	
<i>Pseudoanabaena sp</i>	80								120
<i>Navicula sp1</i>	100	20							
<i>Aulacoseira sp</i>	220	40	1280	620	560		260		13100
<i>Staurastrum sp3</i>								60	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>									100
<i>Scenedesmus ecornis</i>									80
<i>Coelastrum sp1</i>									60
<i>Coelastrum sp6</i>	100	160	200						
<i>Ankistrodesmus sp1</i>								1220	760
<i>Pediastrum duplex</i>								60	
<i>Golenkinia sp</i>	40	60							
<i>Selenastrum sp3</i>	20	100						120	
<i>Actinastrum hantzschii</i>	40								
<i>Actinastrum sp</i>		80			140				
<i>Micractinium sp1</i>	60								
<i>Tetraëdron sp2</i>	40								
<i>Eudorina sp</i>				20	60				
<i>Lepocinclis ovum</i>								240	40
<i>Lepocinclis sp1</i>	40	60					160	160	
<i>Trachelomonas armata</i>	60	80							
<i>Trachelomonas hispida</i>	20	60							
<i>Euglena sp1</i>	40								
<i>Euglena sp2</i>	80								
<i>Euglena sp3</i>		40							
<i>Euglena sp4</i>									100
<i>Phacus tertus</i>		60	40						
Densidad (Ind/L)	28580	24460	13820	21120	66540	25220	150900	173420	34920

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



Tabla 16. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies del fitoplancton en Embalse del Guájaro.

Morfoespecie	Abundancia relativa (%)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Anabaena sp2</i>	7,3				7,2		1,4	0,4	3,7
<i>Planktothrix sp</i>	60,9	52,7	44,4	11,0	1,2	6,7	1,0	1,6	28,7
<i>Raphidiopsis sp 1</i>	16,2	7,7	20,3	16,8	1,1	9,0	0,9	1,6	
<i>Oscillatoria sp3</i>	4,6	12,5	12,3			3,3			26,5
<i>Gomphosphaeria sp</i>	7,6	24,0	2,6			1,9			
<i>Microcystis sp</i>			9,4	69,2	89,3	79,2	96,4	95,4	
<i>Pseudoanabaena sp</i>	0,3								0,3
<i>Navicula sp1</i>	0,3	0,1							
<i>Aulacoseira sp</i>	0,8	0,2	9,3	2,9	0,8		0,2		37,5
<i>Staurostrum sp3</i>								0,0	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>									0,3
<i>Scenedesmus ecornis</i>									0,2
<i>Coelastrum sp1</i>									0,2
<i>Coelastrum sp6</i>	0,3	0,7	1,4						
<i>Ankistrodesmus sp1</i>								0,7	2,2
<i>Pediastrum duplex</i>								0,0	
<i>Golenkinia sp</i>	0,1	0,2							
<i>Selenastrum sp3</i>	0,1	0,4						0,1	
<i>Actinastrum hantzschii</i>	0,1								
<i>Actinastrum sp</i>		0,3			0,2				
<i>Micractinium sp1</i>	0,2								
<i>Tetraëdron sp2</i>	0,1								
<i>Eudorina sp</i>				0,1	0,1				
<i>Lepocinclis ovum</i>								0,1	0,1
<i>Lepocinclis sp1</i>	0,1	0,2					0,1	0,1	
<i>Trachelomonas armata</i>	0,2	0,3							
<i>Trachelomonas hispida</i>	0,1	0,2							
<i>Euglena sp1</i>	0,1								
<i>Euglena sp2</i>	0,3								
<i>Euglena sp3</i>		0,2							
<i>Euglena sp4</i>									0,3
<i>Phacus tertus</i>		0,2	0,3						

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La estructura de la comunidad fitoplanctónica descrita a través de los índices ecológicos observados en la Tabla 17 demuestra que la riqueza específica descrita con los índices de riqueza (Taxa_S) y Margalef demuestran que este atributo es mayor en el Punto 2 ($S= 18$ y $Margalef= 1,686$) y menor en el Punto 7 ($S= 2$ y $Margalef= 0,0811$). Por su parte la estructura de la comunidad, observada desde los índices de dominancia (Dominance_D) permiten evidenciar que es mayor entre los Puntos 6 y 9



(0,9865, 0,9933, 0,9974 y 0,951, respectivamente), la cual se explica debido a las grandes abundancias relativas de *Microcystis* sp en todos estos puntos de muestreo. Considerando las abundancias de estas morfoespecies el índice de equitatividad de Pielou o equidad de Pielou (J') obtuvo valores de bajos a medios, congruentes con la dominancia de Simpson, los cuales identifican a P3 con el menor predominio de especies.

Por último, el índice de diversidad de Shannon, presentó valores mínimos de 0,01073 nats en el P8 y un máximo de 1,738 nats en el P3. Siguiendo la categorización efectuada por Segnini (2003) se indica la presencia de aguas ligeramente contaminadas en los Puntos 2 (1,19) y 3 (1,738), mientras que los puntos restantes presentaron aguas muy contaminadas.

Tabla 17. Índices ecológicos calculados a la comunidad del perifiton en el Embalse del Guájaro

Índices	PUNTOS								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Taxa_S	14	18	12	9	8	8	2	3	10
Individuals	16830	23920	18840	14330	30600	178370	226580	274020	155960
Dominance_D	0,6045	0,538	0,2373	0,5146	0,6568	0,9865	0,9933	0,9974	0,951
Shannon_H	0,9309	1,19	1,738	0,9324	0,5739	0,04708	0,02246	0,01073	0,1428
Margalef	1,336	1,686	1,117	0,8359	0,6777	0,5789	0,0811	0,1597	0,7527
Equitability_J	0,3527	0,4116	0,6994	0,4243	0,276	0,02264	0,0324	0,009763	0,06203

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

6.1.3.2. Zooplancton.

El zooplancton está conformado por organismos microscópicos que flotan libres en el agua entre los que se encuentran especies de varias filas taxonómicas: protozoarios, celenterados, rotíferos, briozoarios y sobre todo, por algunos grupos de crustáceos como los cladóceros, los copépodos y los ostrácodos (Lopez y bello 1993). El zooplancton de agua dulce está compuesto por animales con altas tasas de crecimiento, un rasgo que permite responder rápidamente a ambientes cambiantes (tapia, 2015). En estos organismos, la capacidad para producir la diapausa (estado dinámico de baja actividad metabólica) en los huevos les permite mantener su viabilidad durante décadas o siglos (Hairston, 1996).



El zooplancton constituye uno de los primeros eslabones en la cadena alimenticia acuática este participa activamente en la transferencia de energía y en los ciclos de nutrientes por lo cual estos organismos se consideran con un alto valor ecológico pues son fuente de alimentos de muchos animales que se encuentran en los diferentes sistemas y a su vez son los principales consumidores de algas y bacterias (Gallo-Sanchez 2009).

En el Embalse Del Guájaro, la comunidad de zooplancton estuvo representada por veintiocho (28) morfoespecies, las cuales se encontraron distribuidas en 3 phylum, cinco (5) clases, siete (7) órdenes y trece (13) familias, cuya clasificación taxonómica se encuentra enlistada **Tabla 18**.

Tabla 18. Clasificación Taxonómica del zooplancton en el Embalse Del Guájaro.

Phylum o División	Clase	Orden	Familia	Taxa
Arthropoda	Branchiopoda	Diplostraca	Bosminidae	<i>Bosmina</i> sp
			Chydoridae	<i>Chydorus</i> sp
			Moinidae	<i>Moina</i> sp
			Sididae	<i>Sida</i> sp
	Maxillopoda	Calanoida	-	Calanoida morfo 1
				Larva Nauplio Calanoida
		Cyclopoida	-	Cyclopoida morfo 1
				Larva Nauplio Cyclopoida
		Harpacticoida	-	Harpacticoida morfo 1
	Ostracoda	-	-	Ostracoda morfo 1
				Ostracoda morfo 2
Protozoa	Lobosa	Arcellinida	Arcellidae	<i>Arcella</i> sp
			Centropyxidae	<i>Centropyxis</i> sp
Rotifera	Monogonta	Ploima	Flosculariaceae	
			Filiniidae	<i>Filinia</i> sp
			Asplanchnidae	<i>Asplanchna</i> sp
			Brachionidae	<i>Brachionus angularis</i>
				<i>Brachionus calyciflorus</i>
				<i>Brachionus falcatus</i>
				<i>Brachionus havanaensis</i>
				<i>Brachionus</i> sp
				<i>Keratella americana</i>
				<i>Keratella tropica</i>
				<i>Plationus</i> sp
			Euchlanidae	<i>Euchlanis</i> sp
			Gatropodidae	<i>Ascomorpha</i> sp
			Lecanidae	<i>Lecane</i> sp
				<i>Lecane</i> sp1
			Synchaetidae	<i>Polyarthra</i> sp



Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Se contaron 5088,27 ind/L entre las dos campañas realizadas en el Embalse del Guájaro, donde 3585,25 Ind/L se reportaron en la Campaña 1 y 1503,01 Ind/L para la campaña 2, como ya se mencionó se reportaron en total 28 morfoespecies las cuales se encontraron todas en la campaña 1 y 23 de estas en la campaña 2 (**Figura 18**).

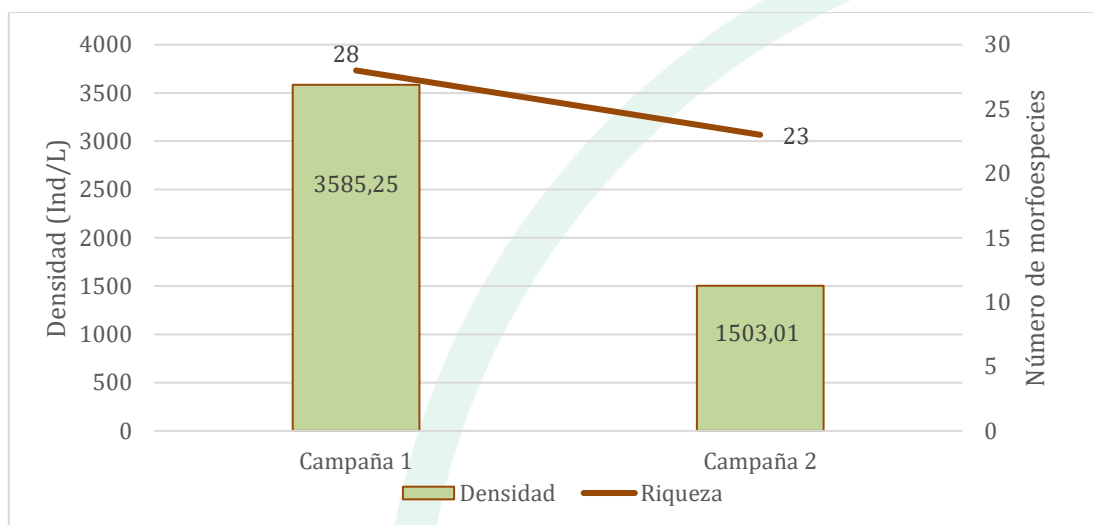


Figura 18. Densidad (Ind/L) total y Riqueza (No. Morfoespecies) total de la comunidad de zooplancton en Embalse Del Guájaro en las dos campañas.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2021.

La morfoespecie con mayor densidad y que se reportó en todos los puntos de monitoreo para las dos campañas fue Larva Nauplio Cycloploida con 741,70 Ind/L en la Campaña 1 y 344,89 Ind/L en la campaña 2, representando el 20,69% y 22,95% respectivamente. Para la campaña 1 el punto donde esta morfoespecie tuvo la mayor densidad fue P8 con 353,60 Ind/L representando el 42,80% y para la campaña 2 el P9* con 95,63 Ind/L representando 59,73%, a su vez el punto en que presentó la densidad más baja fue P7* con 1,42 Ind/L. Además de la morfoespecie antes mencionada *Filinia* sp y Cycloploida morfo1 se presentaron en todos los puntos de monitoreo para la campaña 1 y al menos en 7 de los 9 para la campaña 2. Por su parte *Brachiounus falcatus*, *Ascomorpha* sp y *Keratella americana* también fueron morfoespecies frecuentes en las dos campañas con presentando densidades totales de 345,94 Ind/L, 430,24 Ind/L y 3558,21 Ind/L. Por último, las morfoespecies



menos representativas fueron *Centropixys* sp y Harpacticoida morfo1 las cuales solo aparecieron en un punto de monitoreo en la campaña 1 presentando densidades de 1,42 Ind/L y 2,83 Ind/L respectivamente (Tabla 19,

Tabla 20,

Tabla 21 y

Tabla 22).

La alta proporción de formas inmaduras de copépodos es resultado de la reproducción continua de estos organismos generando solapamientos de cohortes en regiones tropicales, lo que es determinante en la proporción de formas jóvenes y adultas en un sistema, este puede ser un mecanismo de conservación poblacional ante las fluctuaciones ambientales en sistemas continentales activando eventos reproductivos (Edmondson 1959).

Tabla 19. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies de Zooplancton en Embalse del Guájaro parte 1

Morfoespecie	P1	P1 *	P2	P2 *	P3	P3 *	P4	P4*
<i>Arcella</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Ascomorpha</i> sp	60,92	34,00	32,58	13,60	15,74	34,00	7,08	1,70
<i>Asplanchna</i> sp	2,83	0,00	1,42	5,10	0,00	2,13	29,75	34,00
<i>Bosmina</i> sp	2,83	0,00	0,00	0,00	1,57	2,13	59,50	40,80
<i>Brachionus angularis</i>	9,92	17,00	7,08	10,20	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Brachionus calyciflorus</i>	12,75	6,80	0,00	0,00	0,00	0,00	8,50	10,20
<i>Brachionus falcatus</i>	43,92	0,00	42,50	35,70	4,72	2,13	1,42	11,90
<i>Brachionus havanaensis</i>	0,00	0,00	0,00	10,20	0,00	6,38	0,00	0,00
<i>Brachionus</i> sp	4,25	6,80	1,42	3,40	0,00	12,75	0,00	0,00
Calanoida morfo 1	0,00	0,00	5,67	25,50	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Centropixys</i> sp	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Chydorus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,13	8,50	0,00
Cyclopoida morfo 1	43,92	34,00	32,58	27,20	9,44	40,38	85,00	74,80
<i>Euchlanis</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Filinia</i> sp	65,17	17,00	41,08	23,80	7,87	17,00	17,00	28,90
Harpacticoida morfo 1	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Keratella americana</i>	7,08	1,70	1,42	0,00	4,72	12,75	2,83	5,10
<i>Keratella tropica</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	1,57	10,63	0,00	0,00
Larva Nauplio Calanoida	0,00	0,00	0,00	0,00	31,48	8,50	94,92	54,40
Larva Nauplio Cyclopoida	114,75	44,20	59,50	39,10	31,48	34,00	17,00	32,30
<i>Lecane</i> sp	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	10,63	0,00	0,00
<i>Lecane</i> sp1	1,42	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Moina</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Morfoespecie	P1	P1 *	P2	P2 *	P3	P3 *	P4	P4*
Ostracoda morfo 1	2,83	0,00	19,83	17,00	0,00	0,00	14,17	0,00
Ostracoda morfo 2	28,33	23,80	11,33	11,90	3,15	14,88	93,50	119,00
Platyonus sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Polyarthra sp	0,00	0,00	0,00	0,00	6,30	6,38	0,00	0,00
Sida sp	5,67	15,30	7,08	8,50	7,87	14,88	22,67	49,30
Total general	412,25	200,60	266,33	231,20	125,93	231,63	461,83	462,40

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Tabla 20. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies de Zooplancton en Embalse del Guájaro, parte 2.

Morfoespecie	P5	P5 *	P6	P6 *	P7	P7 *	P8	P8 *	P9	P9 *
Arcella sp	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	3,40	0,00	0,00	0,00
Ascomorpha sp	3,15	0,57	63,75	0,00	0,00	0,00	146,20	0,00	17,00	0,00
Asplanchna sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bosmina sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brachionus angularis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brachionus calyciflorus	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Brachionus falcatus	1,57	0,57	34,00	6,38	27,20	0,00	6,80	0,00	120,06	7,08
Brachionus havanaensis	0,00	0,00	29,75	1,06	6,80	0,00	0,00	0,00	10,63	0,71
Brachionus sp	0,00	0,00	27,63	0,00	6,80	0,00	23,80	0,00	2,13	5,67
Calanoida morfo 1	0,00	1,13	8,50	1,06	51,00	0,00	3,40	4,96	7,44	25,50
Centropyxis sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chydorus sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclopoida morfo 1	39,35	10,20	4,25	6,38	3,40	0,00	3,40	3,54	4,25	2,13
Euchlanis sp	0,00	0,00	19,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filinia sp	11,02	2,83	2,13	1,06	20,40	0,00	13,60	0,00	23,38	4,96
Harpacticoida morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Keratella americana	0,00	0,00	29,75	1,06	44,20	0,00	74,80	0,71	170,00	2,13
Keratella tropica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Larva Nauplio Calanoida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Larva Nauplio Cyclopoida	39,35	36,27	29,75	54,19	78,20	1,42	353,60	7,79	18,06	95,63
Lecane sp	1,57	2,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lecane sp1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Moina sp	0,00	22,10	46,75	5,31	119,00	7,08	146,20	22,67	13,81	16,29



Morfoespecie	P5	P5 *	P6	P6 *	P7	P7 *	P8	P8 *	P9	P9 *
Ostracoda morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ostracoda morfo 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Platyonus sp	0,00	0,00	0,00	0,00	343,40	0,00	51,00	0,00	0,00	0,00
Polyarthra sp	0,00	0,00	0,00	15,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sida sp	14,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total general	110,19	76,50	295,38	92,44	700,40	8,50	826,20	39,67	386,75	160,08

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Tabla 21. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies de Zooplancton en Embalse del Guájaro parte 1.

Morfoespecie	P1	P1 *	P2	P2 *	P3	P3 *	P4	P4*
<i>Arcella</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Ascomorpha</i> sp	14,78	16,95	12,23	5,88	12,50	14,68	1,53	0,37
<i>Asplanchna</i> sp	0,69	0,00	0,53	2,21	0,00	0,92	6,44	7,35
<i>Bosmina</i> sp	0,69	0,00	0,00	0,00	1,25	0,92	12,88	8,82
<i>Brachionus angularis</i>	2,41	8,47	2,66	4,41	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Brachionus calyciflorus</i>	3,09	3,39	0,00	0,00	0,00	0,00	1,84	2,21
<i>Brachionus falcatus</i>	10,65	0,00	15,96	15,44	3,75	0,92	0,31	2,57
<i>Brachionus havanaensis</i>	0,00	0,00	0,00	4,41	0,00	2,75	0,00	0,00
<i>Brachionus</i> sp	1,03	3,39	0,53	1,47	0,00	5,50	0,00	0,00
Calanoida morfo 1	0,00	0,00	2,13	11,03	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Centropyxis</i> sp	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Chydorus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	1,84	0,00
Cyclopoida morfo 1	10,65	16,95	12,23	11,76	7,50	17,43	18,40	16,18
<i>Euchlanis</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Filinia</i> sp	15,81	8,47	15,43	10,29	6,25	7,34	3,68	6,25
Harpacticoida morfo 1	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Keratella americana</i>	1,72	0,85	0,53	0,00	3,75	5,50	0,61	1,10
<i>Keratella tropica</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	4,59	0,00	0,00
Larva Nauplio Calanoida	0,00	0,00	0,00	0,00	25,00	3,67	20,55	11,76
Larva Nauplio Cyclopoida	27,84	22,03	22,34	16,91	25,00	14,68	3,68	6,99
<i>Lecane</i> sp	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	4,59	0,00	0,00
<i>Lecane</i> sp1	0,34	0,00	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Moina</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ostracoda morfo 1	0,69	0,00	7,45	7,35	0,00	0,00	3,07	0,00
Ostracoda morfo 2	6,87	11,86	4,26	5,15	2,50	6,42	20,25	25,74
<i>Platyonus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Polyarthra</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	2,75	0,00	0,00
<i>Sida</i> sp	1,37	7,63	2,66	3,68	6,25	6,42	4,91	10,66

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Tabla 22. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies de Zooplancton en Embalse del Guájaro parte 2.



Morfoespecie	P5	P5 *	P6	P6 *	P7	P7 *	P8	P8 *	P9	P9 *
<i>Arcella</i> sp	0,00	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00
<i>Ascomorpha</i> sp	2,86	0,74	21,58	0,00	0,00	0,00	17,70	0,00	4,40	0,00
<i>Asplanchna</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Bosmina</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Brachionus angularis</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Brachionus calyciflorus</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Brachionus falcatus</i>	1,43	0,74	11,51	6,90	3,88	0,00	0,82	0,00	31,04	4,42
<i>Brachionus havanaensis</i>	0,00	0,00	10,07	1,15	0,97	0,00	0,00	0,00	2,75	0,44
<i>Brachionus</i> sp	0,00	0,00	9,35	0,00	0,97	0,00	2,88	0,00	0,55	3,54
Calanoida morfo 1	0,00	1,48	2,88	1,15	7,28	0,00	0,41	12,50	1,92	15,93
<i>Centropyxis</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Chydorus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclopoida morfo 1	35,71	13,33	1,44	6,90	0,49	0,00	0,41	8,93	1,10	1,33
<i>Euchlanis</i> sp	0,00	0,00	6,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Filinia</i> sp	10,00	3,70	0,72	1,15	2,91	0,00	1,65	0,00	6,04	3,10
Harpacticoida morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Keratella americana</i>	0,00	0,00	10,07	1,15	6,31	0,00	9,05	1,79	43,96	1,33
<i>Keratella tropica</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Larva Nauplio Calanoida	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Larva Nauplio Cyclopoida	35,71	47,41	10,07	58,62	11,17	16,67	42,80	19,64	4,67	59,73
<i>Lecane</i> sp	1,43	2,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Lecane</i> sp1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Moina</i> sp	0,00	28,89	15,83	5,75	16,99	83,33	17,70	57,14	3,57	10,18
Ostracoda morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ostracoda morfo 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Plationus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	49,03	0,00	6,17	0,00	0,00	0,00
<i>Polyarthra</i> sp	0,00	0,00	0,00	17,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Sida</i> sp	12,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S.,2022.



En cuanto a la distribución de la densidad del zooplancton en los puntos de monitoreo se observa que el punto con mayor densidad fue P8 con 826,20 Ind/L seguido de P7 y P4* con 700,40 y 461,83 Ind/L. Los puntos con menor densidad fueron P7* y P8* con 8,50 Ind/L y 39,67 Ind/L respectivamente. El resto de los puntos estuvo entre 76,50 Ind/L y 461,83 Ind/L. Para el caso de la riqueza se reporta a P1 con 18 morfoespecies seguido de P3* con 17 morfoespecies, el punto donde se presentó el menor número de morfoespecies fue P7* con dos seguido de P8* con 5 morfoespecies, el resto de los puntos oscilo entre 7 y 14 morfoespecies (**Figura 19**).

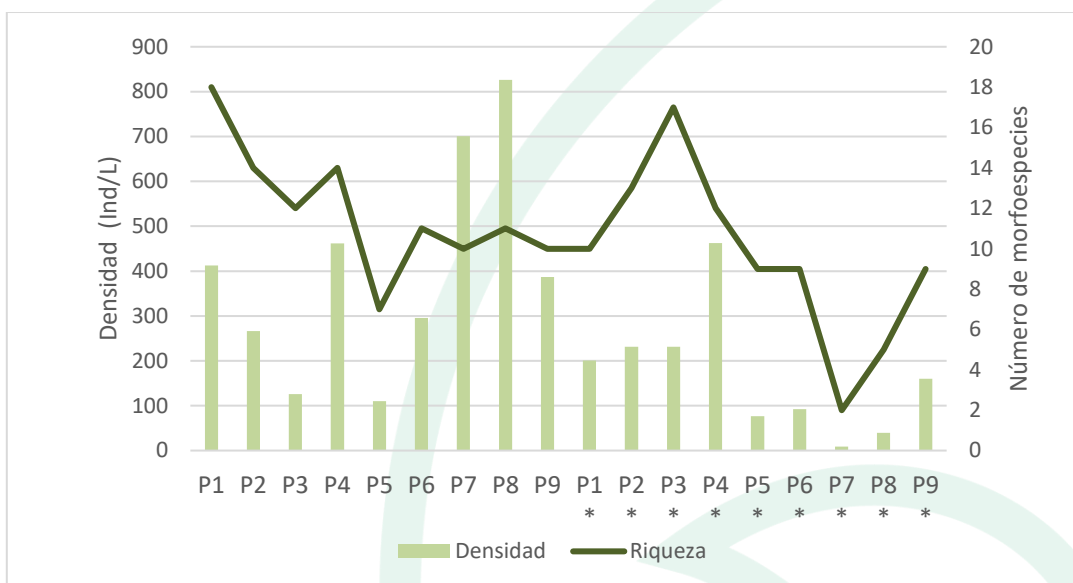


Figura 19. Densidad (Ind/L) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad de zooplancton en Embalse del Guájaro. P* Campaña 2.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

En cuanto a la distribución de los phylum en los puntos de monitoreo el phylum Arthropoda represento el 56,19% del total de las densidades seguido de Rotifera con 43,71% y por último Protozoa con 0,11% (**Figura 20**).

La distribución de los phylum en los puntos de monitoreo nos muestra que Arthropoda y Rotifera se encontraron en todos los puntos de monitoreo excepto en P7* que solo se reportó Arthropoda. Para el caso del phylum Protozoa este solo se reportó en 3 de los 18 puntos de monitoreo en las dos



campañas. Arthropoda presentó su mayor valor en P8 con 506,60 Ind/L seguido del P4 tanto para la campaña 1 como en la 2 en la que presentaron 395,25 Ind/L y 370,60 Ind/L. El phylum Rotifera por su parte presentó su mayor densidad en P7 con 448,80 Ind/L seguido de P9 y P8 con 343,19 Ind/L y 316,20 Ind/L. La menor densidad la presentó en P8* con 0,71 Ind/L seguido de P5* con 6,23 Ind/L. Protozoa como ya se mencionó anteriormente solo presentó en tres de los 18 puntos y en el que presentó el mayor valor fue en P8 con 3,40 Ind/L y su menos valor se dio en P5* con 0,57 Ind/L. (Figura 21).

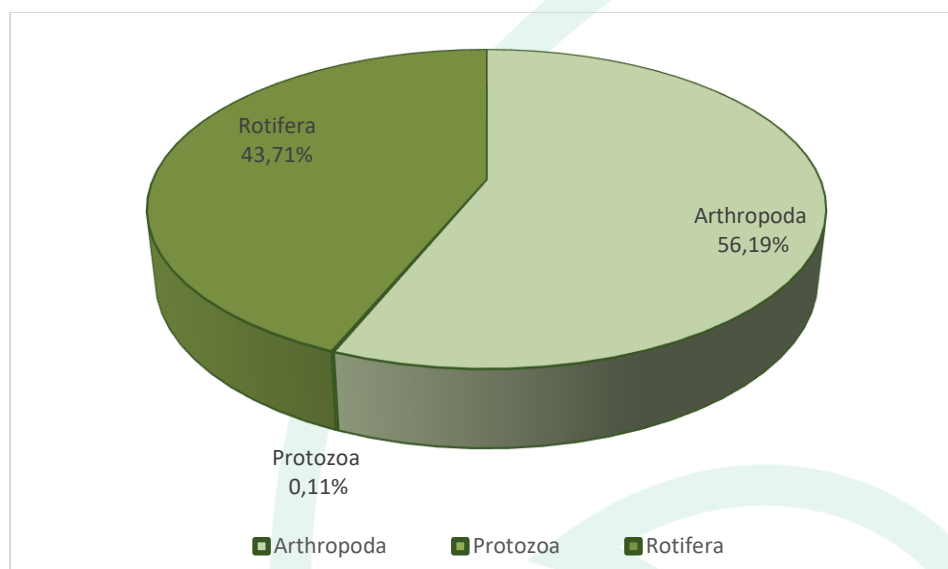


Figura 20. Contribución porcentual de la densidad total de los phylum zooplanctónicos en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Las comunidades de zooplancton dulceacuícolas están constituidas esencialmente por rotíferos y crustáceos lo que es congruente con los encontrados en el embalse del Guájaro. Estos dos grupos junto a Protozoa han sido reportados en puntos con abundante materia orgánica y características eutróficas (Horne & Goldman, 1994). El phylum Rotifera tiene un rol fundamental en las cadenas tróficas pelágicas dado que son filtradores de detritos, bacterias y algas filamentosas, esto los hace eslabón entre el fitoplancton y los consumidores secundarios, además ayudan en la transferencia de materia y energía a diversos organismos planctónicos (Tapia et al. 2015). Otra característica de



este grupo es que exhibe una gran diversificación en agua dulce que puede deberse a que estos tienen su origen en estos tipos de sistemas y muy raramente son encontrados en sistemas marinos. Entre los géneros más comunes de rotíferos se encuentran *Keratella*, *Polyarthra*, *Brachionus*, *Lecane*, *Euchlanis*, *Asplanchna*, *Platyias*, *Testudinella* y *Filinia* (Roldan & Ramírez, 2008).

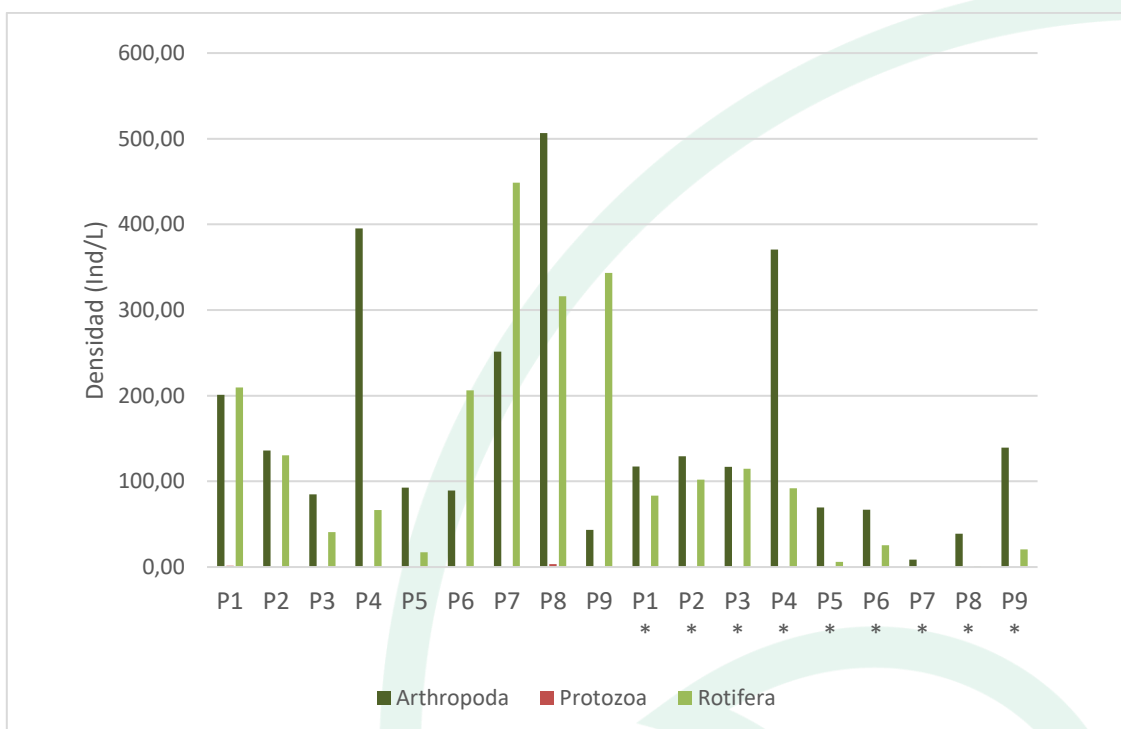


Figura 21. Contribución a la densidad total de los phylum en los puntos de monitoreo en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Otro grupo importante son los crustáceos planctónicos los cuales se dividen en branquiópodos y copépodos. En los branquiopodos los más comunes son los cladóceros. Por su parte los copépodos son crustáceos más complejos que podemos encontrar en diferentes hábitats por lo general son más abundantes y diversos que los rotíferos y los cladóceros (Tapia et al. 2015). En los copépodos podemos encontrar diferentes hábitos alimenticios desde filtradores a depredadores. Los cylopoidas por ejemplo se alimentan de partículas vegetales y otros animales se han reportado cylopodas que se alimentan de larvas de pez o larvas de otros copépodos y rotíferos. Este grupo es



planctónico y son nadadores activos para lo cual usan sus apéndices natatorios, las primeras antenas y el urosoma, en comparación, las nauplius son más estacionarias que los adultos. El comportamiento en la natación así como la migración vertical diaria de los copépodos planctónicos está relacionada con la comida, la luz y la depredación (Suárez-Morales, 2015).

Tabla 23. Índices ecológicos aplicados a la comunidad de zooplancton en el Embalse del Guájaro parte 1

Índice	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Taxa_S	18,00	14,00	12,00	14,00	7,00	11,00	10,00	11,00	10,00
Individuals	412,26	266,32	125,91	461,84	110,18	295,39	700,40	826,20	386,76
Dominance_D	0,15	0,14	0,16	0,14	0,28	0,13	0,29	0,26	0,30
Shannon_H	2,16	2,17	2,09	2,16	1,45	2,16	1,61	1,64	1,55
Margalef	2,82	2,33	2,28	2,12	1,28	1,76	1,37	1,49	1,51
Equitability_J	0,75	0,82	0,84	0,82	0,75	0,90	0,70	0,69	0,67

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Tabla 24. Índices ecológicos aplicados a la comunidad de zooplancton en el Embalse del Guájaro parte 2

Índice	P1*	P2*	P3*	P4*	P5*	P6*	P8*	P9*
Taxa_S	10,00	13,00	17,00	12,00	9,00	9,00	5,00	9,00
Individuals	200,60	231,20	231,68	462,40	76,51	92,44	39,67	160,10
Dominance_D	0,14	0,11	0,10	0,14	0,33	0,39	0,39	0,40
Shannon_H	2,07	2,37	2,51	2,15	1,38	1,35	1,19	1,34
Margalef	1,70	2,21	2,94	1,79	1,84	1,77	1,09	1,58
Equitability_J	0,90	0,92	0,88	0,86	0,63	0,62	0,74	0,61

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Dado que la riqueza (Taxa_S) en P7* fue inferior a cinco (5) no le fueron calculados los índices ecológicos debido a que este número es poco representativo en la estimación de dichos índices, de tal manera que su cálculo resultaría en una sub o sobreestimación de los atributos ecológicos que relacionan los mismos. Para los puntos restantes se calcularon los índices como se muestran en la **Tabla 23**. Los valores de Shannon-Wiener fueron bajos e inferiores a dos(2) en P5, P8 y P9 para las dos campañas al igual que P7 y P6* estando relacionado con sistemas de diversidad relativamente baja con efectos de la contaminación, ya que la presencia de una gran variedad de individuos está directamente relacionada con la disponibilidad y amplitud de los recursos (Roldán y Ramírez, 2008); valores superiores a dos (2) como en el caso de P6 en la campaña 1 y P1, P2, P3 y P4 en ambas campañas indicando que estos puntos se encuentran ligeramente contaminados y que presenta una mayor riqueza que permiten el establecimiento de un mayor número y variedad de individuos



mediante la oferta de recursos. La equidad fue moderadamente alta y congruente con la dominancia en los puntos P1, P2, P3 y P4 de las dos campañas, así como en P6 indicando que las condiciones en estos puntos son óptimas para el establecimiento de las diferentes poblaciones del zooplancton. Para el caso de los puntos P5, P8 y P9 en ambas campañas y P7 y P6* se presentaron valores de Equidad intermedios sugiriendo que algunas morfoespecies presentaban dominancia sobre otras ya que representaban valores cercanos al 50% del total de la densidad total en el punto. Con respecto a los valores obtenidos para la riqueza específica descrita por el índice de Margalef, los valores aquí calculados sugieren baja riqueza específica en todos los puntos monitoreados entre las dos campañas, ya que valores cercanos a 2 son considerados como zonas de baja riqueza específica y valores por encima de 5 como de alta riqueza.

6.1.3.3. Perifiton.

La comunidad perifítica en el Embalse del Guájaro estuvo conformada por 26 morfoespecies distribuidas en cuatro (4) Divisiones, cinco (5) clases, 11 órdenes y 14 familias, cuya clasificación taxonómica se encuentra relacionada en la **Tabla 25**.

Tabla 25. Clasificación taxonómica de las morfoespecies del perifiton observadas en el Embalse del Guájaro.

Phylum o División	Clase	Orden	Familia	Morfoespecie
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Nostocales	Nostocaceae	<i>Anabaena sp1</i>
		Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Oscillatoria sp3</i>
				<i>Oscillatoria sp4</i>
				<i>Lyngbya sp1</i>
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Cymbellales	Gomphonemataceae	<i>Gomphonema sp1</i>
			Cymbellaceae	<i>Gomphonema sp2</i>
		Naviculales	Naviculaceae	<i>Cymbella sp2</i>
				<i>Navicula sp1</i>
				<i>Navicula sp2</i>
				<i>Gyrosigma sp1</i>
			Pinnulariaceae	<i>Pinnularia sp2</i>
		Bacillariales	Bacillariaceae	<i>Nitzschia sp1</i>
				<i>Nitzschia sp2</i>
				<i>Nitzschia sp3</i>
		Eunotiales	Eunotiaceae	<i>Eunotia sp1</i>
				<i>Eunotia sp2</i>
				<i>Eunotia sp3</i>
		Fragilariales	Fragilariaceae	<i>Synedra sp1</i>
				<i>Synedra sp2</i>



Phylum o División	Clase	Orden	Familia	Morfoespecie
				<i>Fragilaria sp</i>
	Coscinodiscophyceae	Aulacoseirales	Aulacoseiraceae	<i>Aulacoseira sp</i>
		Oedogoniales	Oedogoniaceae	<i>Oedogonium sp</i>
Chlorophyta	Chlorophyceae	Sphaeropleales	Scenedesmaceae	<i>Scenedesmus sp1</i>
				<i>Scenedesmus sp2</i>
Euglenozoa	Euglenophyceae	Euglenida	Euglenidae	<i>Euglena sp</i>
			Phacidae	<i>Lepocinclis sp</i>

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La División Bacillariophyta presentó la mayor riqueza, con 17 morfoespecies, lo que representó un aporte del 65,38%, seguido de Cyanobacteria con cuatro (4) morfoespecies, correspondiendo al 15,38%; seguida de las Chlorophyta con tres (3) morfoespecies, equivalente a un aporte del 11,54%, a Euglenozoa como los menores representados, con tan solo dos (2) morfoespecies (15,38%).

Igualmente, las Bacillariophyta presentaron las mayores contribuciones a la densidad, con un aporte total del 56372,7 Ind/cm², lo que representó un 96,22% de los individuos colectados. La importancia ecológica de las diatomeas radica en varios puntos, el primero, Las diatomeas son las microalgas más abundantes en prácticamente todos los ecosistemas acuáticos, segundo las especies de diatomeas están estrechamente vinculadas a las características químicas de las aguas donde viven, creciendo en rangos particulares de variables ambientales, como pH, salinidad, concentración de nutrientes, sedimentos en suspensión por eso son utilizadas en la evaluación y monitoreo ambiental, Finalmente su cubierta celular silíceas no se descompone, por lo que las diatomeas de sedimentos pueden ser utilizadas para interpretar las condiciones pasadas (Liukkonen et al., 1997; Gabito et al., 2013). Las Cianobacterias le siguieron en importancia con aportes de 1677 Ind/cm² (2,86%), seguidas por las clorofitas y los euglenozoos, con abundancias de 501,6 Ind/cm² (0,86%) y 34,2 Ind/cm² (0,06%), respectivamente, como se observa en la **Figura 22**. Al ser contrastado con el registro histórico del año 2021 (**Figura 22B**), se evidencia el mismo predominio de las diatomeas, con un aporte de 82370,5 Ind/cm², equivalentes a un 75,62% de la abundancia total, seguidas por las cianobacterias, con 25389,9 Ind/cm², un 23,31%.



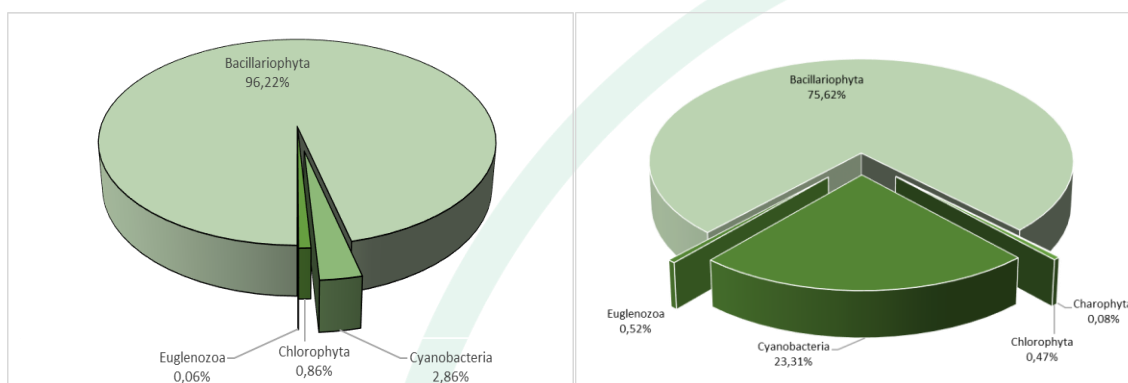


Figura 22. Contribución porcentual de las Divisiones del perifiton a la densidad total en el Embalse del Guájaro. A) Año 2022 y B) Año 2021

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La distribución espacial de las morfoespecies (**Figura 23**) demostró fluctuaciones en las zonas del embalse, la zona norte y centro con riquezas medias a altas (P2, 10 morfoespecies y P5 con 16 morfoespecies) y densidades bajas a medias (P6 con 3416 Ind/cm² y P3 con 10144 Ind/cm²), mientras que en la zona sur se presentó una riqueza baja con densidades altas (P9 con 8 morfoespecies y 18989 Ind/cm²). La comparación histórica contra el año 2021 pone en evidencia las pequeñas fluctuaciones en la riqueza de especies, mientras que para la abundancia se evidencia que la mayoría de los puntos de muestreo experimentó pérdida de densidad perifítica, resaltando la pérdida de casi el 40% en el Punto 9, más del 50% en el Punto 1, y casi el 90% en el Punto 6.



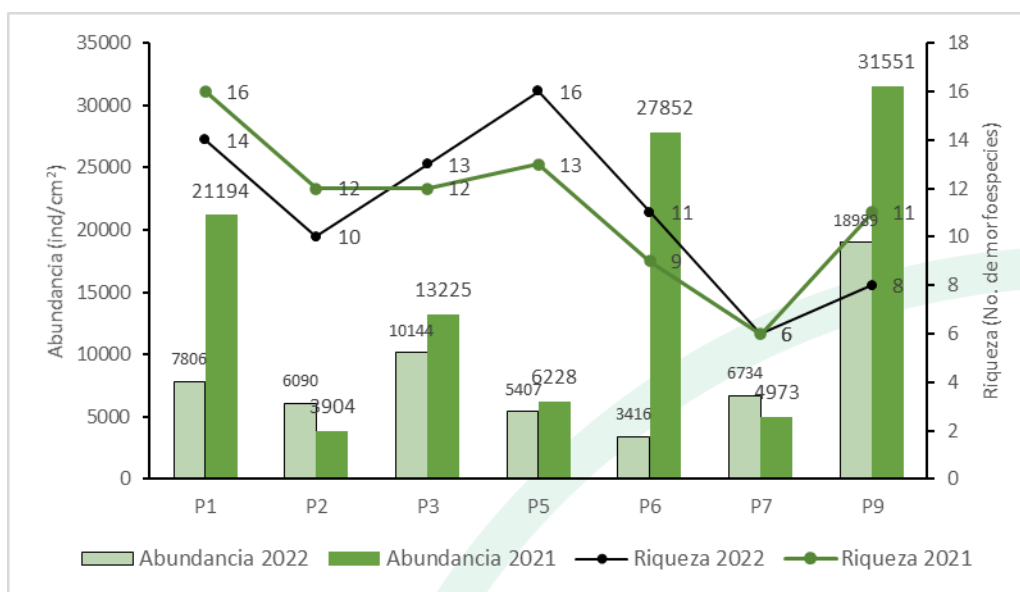


Figura 23. Densidad (Ind/cm²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad perifítica en el Embalse del Guájaro contrastando los años 2022 y 2021.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La distribución espacial de los taxones mayores durante el presente muestreo se comportó de manera similar a la distribución general las Divisiones, con predominio de Bacillariophyta en todos los puntos de muestreo, mientras que las clorofitas no se observaron en los Puntos 7 y 9 y cianobacterias en el Punto 2. Por su parte los euglenozoos solo hicieron presencia en los Puntos 2 y 5. El análisis histórico reveló que el comportamiento observado se repitió durante el año 2021, con predominio de diatomeas en todos los puntos de muestreo, seguidos de cianobacterias.



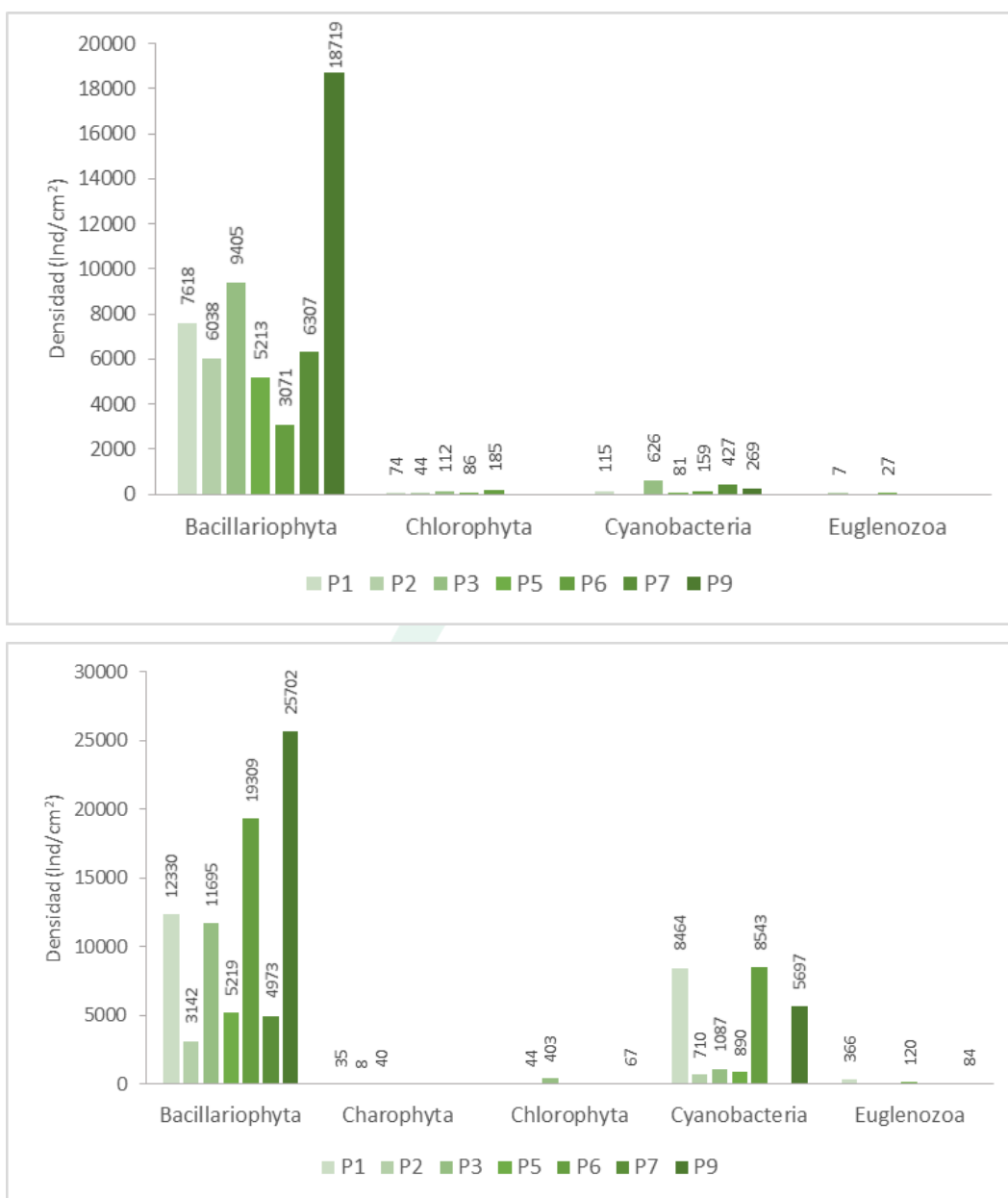


Figura 24. Densidad (Ind/cm²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad perifítica en el Embalse del Guájaró

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



Las morfoespecies más abundantes durante el presente estudio fueron *Navicula sp1*, *Nitzschia sp3* y *Gomphonema sp1*, con densidades máximas de 12142,88, 3082 y 1051,08 Ind/L en los Puntos P7, P1 y P6 respectivamente, estas morfoespecies representaron el 63,95%, 39,48% y 30,77% de las abundancias relativas en cada uno de los puntos respectivos (**Tabla 26** y **Tabla 27**). Todas estas morfoespecies pertenecen la División Bacillariophyta, conocidos como diatomeas, cuya dominancia puede estar asociada al estado eutrófico del sistema según Morales y Salazar (2012) y Arcos, Ávila, Estupiñán y Gómez (2005).

Tabla 26. Densidad (Ind/L) de las morfoespecies del perifiton en Embalse del Guájaro durante el año 2022

Morfoespecie	DENSIDAD (Individuos/cm ²)							AB Total
	P1	P2	P3	P5	P6	P7	P9	
<i>Anabaena sp1</i>			626,05					626,1
<i>Oscillatoria sp3</i>						426,65		426,6
<i>Oscillatoria sp4</i>	115,00			80,54				195,5
<i>Lyngbya sp1</i>					159,38		269,34	428,7
<i>Gomphonema sp1</i>	924,60	440,00	899,95	402,68	1051,08	853,30	606,02	5.177,6
<i>Gomphonema sp2</i>	607,20	351,26	528,23	354,36	258,46	380,52	104,74	2.584,8
<i>Cymbella sp2</i>	78,20			123,49	64,62		3793,25	4.059,6
<i>Navicula sp1</i>	3082,00	1556,64	709,20	1669,80	516,92		12142,88	19.677,4
<i>Navicula sp2</i>				16,11				16,1
<i>Gyrosigma sp1</i>	73,60	36,97	146,73					257,3
<i>Pinnularia sp2</i>				16,11				16,1
<i>Nitzschia sp1</i>	1265,00		440,19		590,15	247,92		2.543,3
<i>Nitzschia sp2</i>				75,17	163,69			238,9
<i>Nitzschia sp3</i>		2089,08	3017,77	1761,07		472,77		7.340,7
<i>Eunotia sp1</i>	593,40	288,40	763,00	220,13	305,85			2.170,8
<i>Eunotia sp2</i>	377,20	125,71	420,63	182,55	120,62			1.226,7
<i>Eunotia sp3</i>	92,00		14,67	32,21				138,9
<i>Synedra sp1</i>	257,60		327,70				965,15	1.550,4
<i>Synedra sp2</i>						4352,97	501,28	4.854,2
<i>Fragilaria sp</i>	138,00	1149,92	2137,38	359,73			606,02	4.391,1
<i>Aulacoseira sp</i>	128,80							128,8
<i>Oedogonium sp</i>	73,60	44,37	112,49	85,91				316,4
<i>Scenedesmus sp1</i>					133,54			133,5
<i>Scenedesmus sp2</i>					51,69			51,7
<i>Euglena sp</i>		7,39		16,11				23,5
<i>Lepocinclis sp</i>				10,74				10,7
	7806,20	6089,75	10144,02	5406,71	3416,00	6734,12	18988,69	58.585,5

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



Tabla 27. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies del perifiton en Embalse del Guájaro durante el año 2022.

Morfoespecie	ABUNDANCIA RELATIVA (%)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
<i>Anabaena sp1</i>	0,00	0,00	6,17	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Oscillatoria sp3</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,34	0,00
<i>Oscillatoria sp4</i>	1,47	0,00	0,00	1,49	0,00	0,00	0,00
<i>Lyngbya sp1</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	4,67	0,00	1,42
<i>Gomphonema sp1</i>	11,84	7,23	8,87	7,45	30,77	12,67	3,19
<i>Gomphonema sp2</i>	7,78	5,77	5,21	6,55	7,57	5,65	0,55
<i>Cymbella sp2</i>	1,00	0,00	0,00	2,28	1,89	0,00	19,98
<i>Navicula sp1</i>	39,48	25,56	6,99	30,88	15,13	0,00	63,95
<i>Navicula sp2</i>	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
<i>Gyrosigma sp1</i>	0,94	0,61	1,45	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Pinnularia sp2</i>	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
<i>Nitzschia sp1</i>	16,21	0,00	4,34	0,00	17,28	3,68	0,00
<i>Nitzschia sp2</i>	0,00	0,00	0,00	1,39	4,79	0,00	0,00
<i>Nitzschia sp3</i>	0,00	34,30	29,75	32,57	0,00	7,02	0,00
<i>Eunotia sp1</i>	7,60	4,74	7,52	4,07	8,95	0,00	0,00
<i>Eunotia sp2</i>	4,83	2,06	4,15	3,38	3,53	0,00	0,00
<i>Eunotia sp3</i>	1,18	0,00	0,14	0,60	0,00	0,00	0,00
<i>Synedra sp1</i>	3,30	0,00	3,23	0,00	0,00	0,00	5,08
<i>Synedra sp2</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	64,64	2,64
<i>Fragilaria sp</i>	1,77	18,88	21,07	6,65	0,00	0,00	3,19
<i>Aulacoseira sp</i>	1,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Oedogonium sp</i>	0,94	0,73	1,11	1,59	0,00	0,00	0,00
<i>Scenedesmus sp1</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	3,91	0,00	0,00
<i>Scenedesmus sp2</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	1,51	0,00	0,00
<i>Euglena sp</i>	0,00	0,12	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
<i>Lepocinclis sp</i>	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La estructura de la comunidad perifítica descrita a través de los índices ecológicos observados en la **Tabla 28** demuestra que la riqueza específica descrita con los índices de riqueza (Taxa_S) y Margalef demuestran que este atributo es mayor en el Punto 5 ($S = 16$ y $Margalef = 1,745$) y menor en el Punto 7 ($S = 6$ y $Margalef = 0,5673$). Por su parte la estructura de la comunidad, observada desde los índices de dominancia (Dominance_D) permiten evidenciar que es mayor en los Puntos 9 y 7 (0,4544 y 0,4474), la cual se explica debido a las grandes abundancias relativas de los taxones *Navicula sp1* y *Cymbella sp2* (63,95 y 19,98 %) en el Punto 9 y de *Synedra sp2* (64,64%) en el Punto 7. Por otra parte, la estructura observada desde los índices de equidad demostró valores del índice de Shannon con un mínimo de 1,164 nats en el P9 y un máximo de 2,11 en el P3. Considerando las abundancias de estas morfoespecies el índice de equitatividad de Pielou o equidad de Pielou (J') obtuvo un valor



medio, pero congruente con la dominancia de Simpson, que identifican a P6 con el menor predominio de especies.

Por último, los valores de la diversidad de Shannon, presentó valores máximos de 2,11 en el P3 y mínimos de 1,164 en el P9. Un valor de diversidad (H') entre 1 y 3 se encuentran en agua ligeramente contaminada (Segnini, S. 2003).

Tabla 28. Índices ecológicos calculados a la comunidad del perifiton en el Embalse del Guájaro.

Índices	PUNTOS						
	P1	P2	P3	P5	P6	P7	P9
Taxa_S	14	10	13	16	11	6	8
Individuals	7802	6085	10138	5400	3410	6730	18986
Dominance_D	0,2126	0,23	0,1628	0,2198	0,169	0,4474	0,4544
Shannon_H	1,956	1,684	2,11	1,894	2,035	1,189	1,164
Margalef	1,451	1,033	1,301	1,745	1,229	0,5673	0,7106
Equitability_J	0,741	0,7315	0,8225	0,6833	0,8487	0,6636	0,5597

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

6.1.3.4. Macrófitas.

En el Embalse del Guájaro se reportaron siete (7) especies de macrófitas distribuidas en seis (6) familias, seis (6) Ordenes, tres (3) Clases y dos (2) Divisiones (**Tabla 29**).

Tabla 29. Riqueza de las macrófitas acuáticas reportadas en el Embalse del Guájaro.

División	Clase	Orden	Familia	Morfoespecie
Angiospermophyta	Magnoliopsida	Solanales	Convolvulaceae	<i>Ipomea sp</i>
Magnoliophyta	Liliopsida	Typhales	Typhaceae	<i>Typha domingensis</i>
		Alismatales	Araceae	<i>Lemna minor</i>
				<i>Pistia stratiotes</i>
		Cyperales	Poaceae	<i>Paspalum sp2</i>
		Liliales	Pontederiaceae	<i>Eichhornia crassipes</i>
	Magnoliopsida	Fabales	Fabaceae	<i>Mimosa pudica</i>

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Se reportaron especies de macrófitas acuáticas en los todos los puntos monitoreados. De ellas, las de mayor área de cobertura promedio la presentó *Eichhornia crassipes*, con un total del 29,5% del área evaluada, seguida por *Paspalum sp2* (13,4%), mientras que las especies restantes se reportaron



áreas de menos al 5%. Al evaluar la distribución espacial se evidenció que *Eichhornia crassipes* presentó la mayor cobertura en los Puntos 2 (72,8%), 5 (92%) y 9 (49,8%), mientras que *Paspalum* sp2 lo fue en el Punto 1 (67,6%) y 6 (52,8) y *Lemna minor* lo fue en el Punto3 (38,8%) como se observa en la **Tabla 30** y la **Figura 25**. Se resaltan los aportes de *Mimosa pudica* y *Lemna minor* las cuales fueron exclusivas de los Puntos 1 y 3 respectivamente, mientras que *Typha domingensis* hizo presencia en los Puntos de 2 y 9, e igualmente *Paspalum* sp2 fue reportada en dos puntos, el Punto 1 y el Punto 6. Por último, se resalta que la especie común fue *Eichhornia crassipes*, presente en todos los puntos de muestreo, seguida por *Ipomea* sp, presente en los Puntos 2, 3, 5 y 9.

Como lo indicó Guevara y Ramírez (2015) *Eichhornia crassipes* es una especie de alta capacidad reproductiva y adaptativa, lo que ha llevado a incluirla entre las 10 malezas más invasivas del mundo, indicando además que puede causar problemas adversos sobre la flora y fauna nativa, ya que, al formar densas colonias flotadoras, produce un descenso en el flujo del agua de ciénagas y embalses, así como produce reducción de la cantidad de luz que penetra la masa de agua y disminución del oxígeno disuelto.

Tabla 30. Porcentaje de Cobertura (%) de las macrófitas acuáticas en el Embalse del Guájaro.

Morfoespecie	Porcentaje de cobertura (% cobertura)						
	P1	P2	P3	P5	P6	P9	% Total
<i>Ipomea</i> sp	0,0	21,2	0,8	4,4	0,0	9,7	4,0
<i>Typha domingensis</i>	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	16,0	2,4
<i>Lemna minor</i>	0,0	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0	4,3
<i>Pistia stratiotes</i>	0,0	0,0	0,0	3,6	12,8	21,8	4,2
<i>Paspalum</i> sp2	67,6	0,0	0,0	0,0	52,8	0,0	13,4
<i>Eichhornia crassipes</i>	13,2	72,8	3,6	92,0	34,4	49,8	29,5
<i>Mimosa pudica</i>	16,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



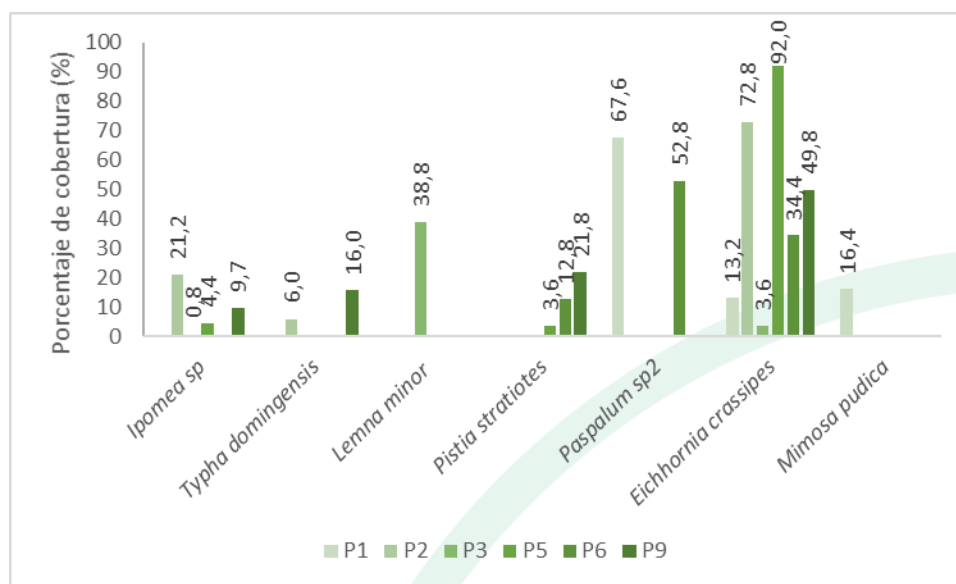


Figura 25. Porcentaje de cobertura de las macrófitas acuáticas en el Embalse del Guájaro.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La estructura de la comunidad de macrófitas descrita a través de los índices ecológicos (**Tabla 31**) demuestran que la riqueza específica descrita con los índices de riqueza (Taxa_S) y de Margalef es muy similar en los Puntos 1 ($S=3$ y Margalef= 0,438), 2 ($S=3$ y Margalef= 0,435), 3 ($S=3$ y Margalef= 0,539), 5 ($S=3$ y Margalef= 0,435) y 6 ($S=3$ y Margalef= 0,436); mientras que fue un poco mayor en el Punto 9 ($S=4$ y Margalef= 0,659). Por su parte la estructura de la comunidad, observada desde los índices de dominancia (Dominance_D) permiten evidenciar que fue mayor en el Punto 5 (0,850), seguida del Punto 3 (0,814). Por otra parte, la estructura observada desde los índices de equidad demostró valores medios del índice de Shannon en el Punto 9 (1,205), mientras que los puntos restantes presentaron valores bajos (entre 0,334, en el Punto 5 y 0,967 en el Punto 6). Considerando las abundancias de las morfoespecies, el índice de equitatividad de Pielou o equidad de Pielou (J') obtuvo un valor de bajo en los Puntos 3 (0,344) y 5 (0,304); medios en los Puntos 1 (0,750) y 2 (0,663) y alto en los Puntos 6 (0,881) y 9 (0,869).

Por último, los valores de la diversidad de Shannon, con valores de 1,205 en el Punto 9, indicó la presencia de aguas ligeramente contaminadas, mientras que, en los puntos restantes, con valores



entre 0,334 (Punto 5) y 0,967 (Punto 6), fueron indicativos de la presencia de aguas muy contaminadas, según la categorización realizada por Segnini (2003).

Tabla 31. Índices ecológicos calculados a la comunidad de macrófitas acuáticas en el Embalse del Guájaro.

Índices	Puntos de muestreo					
	P1	P2	P3	P5	P6	P9
Taxa_S	3	3	3	3	3	4
Individuals	96	99	41	99	98	95
Dominance_D	0,531	0,579	0,814	0,850	0,414	0,349
Shannon_H	0,824	0,729	0,377	0,334	0,967	1,205
Margalef	0,438	0,435	0,539	0,435	0,436	0,659
Eqitability_J	0,750	0,663	0,344	0,304	0,881	0,869

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

6.1.3.5. Macroinvertebrados bentónicos.

Los macroinvertebrados bentónicos comprenden aquellos organismos asociados al fondo de los ríos, lagos y ciénagas que por lo general son visibles al ojo humano ya que su tamaño es mayor a 0,3 mm de longitud. Son mayormente sedentarios y cumplen parte de su ciclo vital en el medio acuático (Termeus, *et al.*, 2012)., pertenecen a un grupo taxonómicamente muy diverso en el que se incluyen clases como la Insecta, Crustácea, Oligochaeta, Malacostraca, Turbellaria, Artrópodos, Arachnoidea y Mollusca, principalmente de insectos en su fase larvaria. Los macroinvertebrados juegan un papel importante en todos los procesos ecológicos de los sistemas acuáticos, son un enlace importante para la transferencia de energía a diversos niveles tróficos de las cadenas alimentarias acuáticas, aceleran los procesos de descomposición de detritos y contribuyen al reciclaje de nutrientes (Hanson, *et al.*, 2010); además, consumen gran cantidad de algas y otros microorganismos asociados con el perifiton en los ríos o con el plancton en los lagos y, muchas veces, este consumo aumenta la productividad primaria, ya que se elimina el tejido poco productivo y se mineralizan los nutrientes (Allan y Castillo, 2007).

En el Embalse Del Guájaro, la comunidad de macroinvertebrados bentónicos estuvo representada por trece (13) morfoespecies, las cuales se encontraron distribuidas en dos (2) phylum, cuatro (4)



clases, nueve (9) órdenes y once (11) familias, cuya clasificación taxonómica se encuentra enlistada

Tabla 32.

Tabla 32. Clasificación Taxonómica de los macroinvertebrados bentónicos en el Embalse del Guájaro.

Phylum o División	Clase	Orden	Familia	Taxa
Arthropoda	Crustacea	-	-	Ostracoda morfo 1
	Insecta	Coleoptera	Hydrophilidae	<i>Tropisternus</i> sp
		Diptera	Ceratopogonidae	<i>Stilobezzia</i> sp
			Chironomidae	Chironomidae morfo1
		Ephemeroptera	Polymitarcyidae	<i>Campsurus</i> sp
		Hemiptera	Belostomatidae	<i>Belostoma</i> sp
		Odonata	Coenagrionidae	<i>Acanthagrion</i> sp
		Trichoptera	Glossosomatidae	Glossosomatidae morfo 1
Mollusca	Bivalvia	Veneroida	Corbiculidae	<i>Polymesoda</i> sp
	Gastropoda	Architaenioglossa	Ampullaridae	<i>Marisa</i> sp
				<i>Pomacea</i> sp
		Neotaenioglossa	Hydrobiidae	Hydrobiidae morfo 1
			Thiaridae	<i>Melanoides</i> sp

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Se contaron 10035,18 Ind/m² entre las dos campañas realizadas en el Embalse del Guájaro, donde 8507,41 Ind/m² se reportaron en la Campaña 1 y 1527,78 Ind/m² para la campaña 2, como ya se mencionó se reportaron en total 13 morfoespecies las cuales se encontraron 5 en la campaña 1 y 12 de estas en la campaña 2. Esto podría sugerir que para el momento de la campaña dos se dieron condiciones favorables para el establecimiento de nuevas morfoespecies, mientras que en la campaña 1 las condiciones favorecían a determinadas poblaciones que incrementaron sus densidades (**Figura 26**).



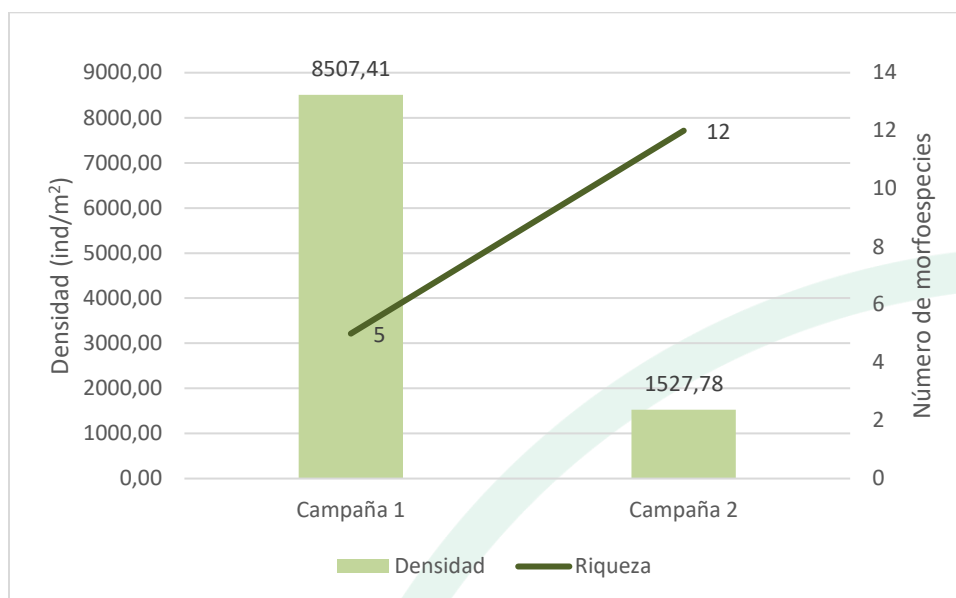


Figura 26. Densidad (Ind/m²) total y Riqueza (No. Morfoespecies) total de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en Embalse Del Guájaro en las dos campañas.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La morfoespecie con mayor densidad fue Hydrobiidae morfo 1 con 7325,95 Ind/m² representando el 73% del total de las dos campañas y esta se reportó en los puntos P5 a P9 entre las dos campañas. Los valores más altos de densidad de esta morfoespecie se reportaron en P9 en las dos campañas con 6133,33 Ind/m² para la campaña 1 y 1192,59 Ind/m² para la campaña 2, representando el 100% y 97,37% respectivamente. Además de la morfoespecie antes mencionada *Melanoides* sp presentó la segunda mayor densidad con 2298,15 representando el 22,99%. Esta morfoespecie se presentó en 14 de los 18 puntos muestreados. La mayor densidad de esta morfoespecie se presentó en P6 Y P7 para las dos campañas. Por su parte *Marisa* sp y *Polymesoda* sp se presentaron en 8 y 7 puntos de monitoreo con 68,52 Ind/m² y 262,96 Ind/m² respectivamente. Por último, las morfoespecies menos representativas fueron *Stilobezzia* sp, *Belostoma* sp, Glossosomatidae morfo 1 y *Pomacea* sp con 1,85 Ind/m² y estas mismas solo aparecieron en un punto de monitoreo de los 18 totales (**Tabla 33, Tabla 34, Tabla 35 y Tabla 36**).



La familia Hydrobiidae, comprende especies de moluscos de talla media a pequeña, operculados y principalmente de agua dulce o salobre, su reproducción es partenogenética, por lo que alcanzan a formar densas poblaciones en intervalos de tiempo corto (Pérez *et al.*, 2004), por lo general se encuentran asociados a fondos blandos, muchas de sus especies habitan sedimentos anóxicos presentando un incremento poblacional ante la presencia de cargas puntuales de materia orgánica, Bemvenuti *et al.* (2003), las consideran generalistas, con alta tolerancia a impactos antrópicos y alta resiliencia en ecosistemas impactados.

El género *Melanooides* presenta una amplia distribución ya que se puede encontrar en diferentes tipos de hábitat desde ríos, quebradas, arroyos, caños, canales y otros sistemas lénticos naturales y artificiales, incluidos los embalses. Se ha descrito que la dispersión de especies de este género como *M. tuberculata* se da por transporte sobre aves acuáticas y arrastre en ríos. además, al ser individuos partenogenéticos un solo individuo puede colonizar y formar una nueva población, por lo cual se les considera de gran importancia ecológica dada la afectación al establecimiento de otras poblaciones de macroinvertebrados (Albarran- Melze *et al.*, 2009). Es un habitante común de aguas contaminadas con desechos de origen orgánico y eutrofizadas, resiste altos niveles de contaminación por lo que resulta en un buen indicador de condiciones de anoxia y algo de salinidad (Lasso, 2011). Esta especie es altamente móvil, consume desechos generados por los humanos y se adapta a diferentes entornos (CABI, 2018).

Tabla 33. Densidad (Ind/m²) de las morfoespecies de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro parte 1.

Morfoespecie	P1	P1 *	P2	P2 *	P3	P3 *	P4	P4*
<i>Acanthagrion</i> sp	0,00	9,26	0,00	0,00	0,00	1,85	0,00	0,00
<i>Belostoma</i> sp	0,00	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Campsurus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chironomidae morfo1	0,00	29,63	0,00	1,85	0,00	0,00	0,00	3,70
Glossosomatidae morfo 1	0,00	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hydrobiidae morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Marisa</i> sp	0,00	0,00	0,00	1,85	22,22	0,00	11,11	0,00
<i>Melanooides</i> sp	33,33	9,26	33,33	7,41	0,00	3,70	22,22	0,00
Ostracoda morfo 1	0,00	3,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Polymesoda</i> sp	66,67	1,85	44,44	0,00	55,56	1,85	0,00	0,00
<i>Pomacea</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Morfoespecie	P1	P1 *	P2	P2 *	P3	P3 *	P4	P4*
<i>Stilobezzia</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,85
<i>Tropisternus</i> sp	0,00	3,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total general	100,00	61,11	77,78	11,11	77,78	7,41	33,33	5,56

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Tabla 34. Densidad (Ind/m²) de las morfoespecies de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro, parte 2.

Morfoespecie	P5	P5 *	P6	P6 *	P7	P7 *	P8	P8 *	P9	P9 *
<i>Acanthagrion</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Belostoma</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Campsurus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	18,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chironomidae morfo1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Glossosomatidae morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hydrobiidae morfo 1	40,74	0,00	0,00	14,81	1166,67	40,74	0,00	40,74	4925,93	1096,30
<i>Marisa</i> sp	3,70	3,70	0,00	0,00	0,00	3,70	18,52	3,70	0,00	0,00
<i>Melanoides</i> sp	62,96	0,00	703,70	62,96	1055,56	62,96	148,15	62,96	0,00	29,63
Ostracoda morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Polymesoda</i> sp	0,00	0,00	74,07	18,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Pomacea</i> sp	0,00	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Stilobezzia</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Tropisternus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total general	107,41	5,56	777,78	96,30	2240,74	107,41	166,67	107,41	4925,93	1125,93

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Tabla 35. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro parte 1.

Morfoespecie	P1	P1 *	P2	P2 *	P3	P3 *	P4	P4*
<i>Acanthagrion</i> sp	0,00	15,15	0,00	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00
<i>Belostoma</i> sp	0,00	3,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Campsurus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chironomidae morfo1	0,00	48,48	0,00	16,67	0,00	0,00	0,00	66,67
Glossosomatidae morfo 1	0,00	3,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hydrobiidae morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Marisa</i> sp	0,00	0,00	0,00	16,67	28,57	0,00	33,33	0,00
<i>Melanoides</i> sp	33,33	15,15	42,86	66,67	0,00	50,00	66,67	0,00
Ostracoda morfo 1	0,00	6,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Polymesoda</i> sp	66,67	3,03	57,14	0,00	71,43	25,00	0,00	0,00
<i>Pomacea</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Stilobezzia</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,33
<i>Tropisternus</i> sp	0,00	6,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



Tabla 36. Abundancia relativa (%) de las morfoespecies de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro parte 2.

Morfoespecie	P5	P5 *	P6	P6 *	P7	P7 *	P8	P8 *	P9	P9 *
<i>Acanthagrion</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Belostoma</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Campsurus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chironomidae morfo1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Glossosomatidae morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hydrobiidae morfo 1	37,93	0,00	0,00	15,38	52,07	37,93	0,00	37,93	100,00	97,37
<i>Marisa</i> sp	3,45	66,67	0,00	0,00	0,00	3,45	11,11	3,45	0,00	0,00
<i>Melanoides</i> sp	58,62	0,00	90,48	65,38	47,11	58,62	88,89	58,62	0,00	2,63
Ostracoda morfo 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Polymesoda</i> sp	0,00	0,00	9,52	19,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Pomacea</i> sp	0,00	33,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Stilobezzia</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Tropisternus</i> sp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Los macroinvertebrados bentónicos en el Embalse Del Guájaro presentaron la mayor densidad en P9 con 4925,93 Ind/m², seguido de P7, P9* y P6 con 2240,74 Ind/m², 1125,93 Ind/m² y 777,77 Ind/m² Respectivamente. El resto de los puntos presentó valores entre 166,67 Ind/m² y 5,56 Ind/m². En cuanto a la riqueza el punto con la máxima fue P1* con 8 morfoespecies los demás puntos presentaron entre 2 y 3 morfoespecies solo en P9 se reportó una morfoespecie (**Figura 27**).



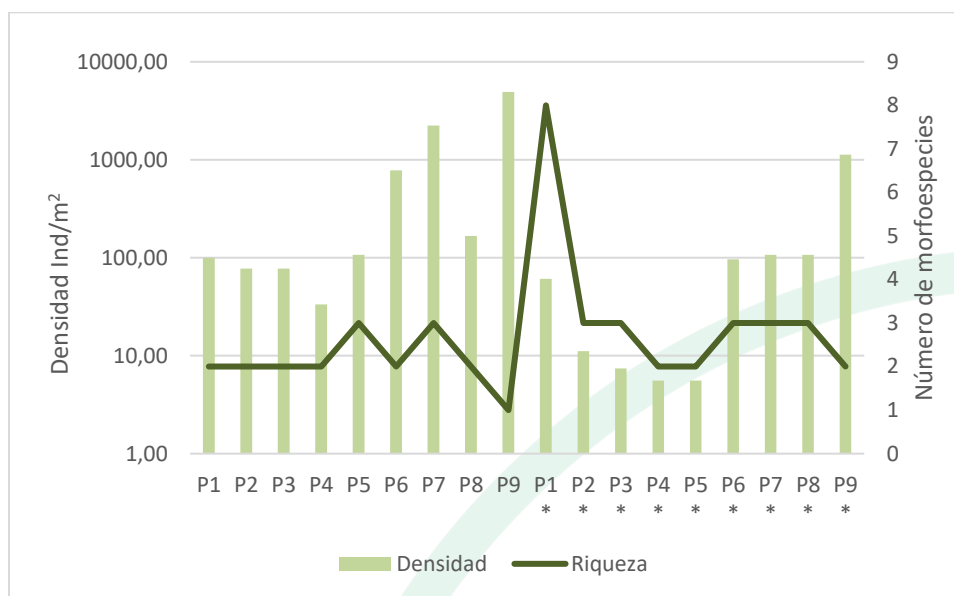


Figura 27. Densidad (Ind/m²) y Riqueza (No. Morfoespecies) de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en Embalse del Guájaro. Escala logarítmica. P* Campaña 2.
 Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

En el área de monitoreo las 13 morfoespecies estuvieron distribuidas en dos phylum, Mollusca tuvo la mayor representación en cuanto a la densidad en el área de estudio con el 99,22% y el restante 0,78% lo obtuvo Arthropoda (**Figura 28**).

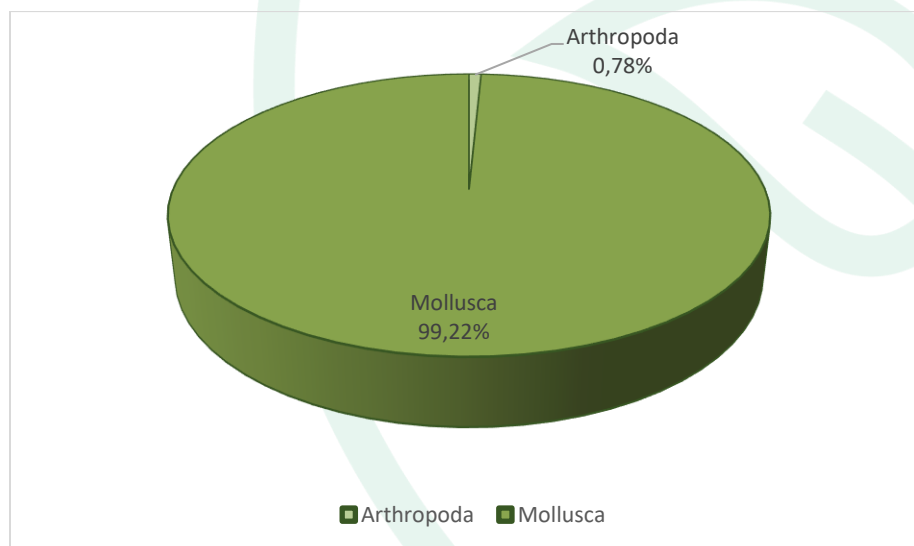


Figura 28. Contribución porcentual de la densidad total de los phylum en el Embalse del Guájaro.
 Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



La distribución de los phylum en el área de estudio muestra que Mollusca se encontró presente en todos los puntos de monitoreo en cuanto a Arthropoda solo se presentó en 5 de los 18 puntos, además se observa que para la campaña 1 este phylum solo se presentó en un punto (P7) en cambio para la campaña dos tuvo más presencia.

La dominancia de Mollusca se encuentra dada por el grado de sensibilidad ambiental de sus taxones que tiende a ser bastante amplio, particularmente, esta división estuvo representada por gasterópodos los cuales son un componente muy importante de las comunidades en ecosistemas acuáticos como el del embalse del Guájaro ya que juegan un rol vital en el procesamiento de la materia orgánica y detritos. Estos moluscos se alimentan generalmente de vegetales, detritos o del Perifiton que cubre sustratos duros en los ríos, lagos y lagunas. Pueden incluso flotar en la superficie del agua sin romper la tensión superficial, alimentándose de algas flotantes. Existen ciertos factores ecológicos importantes, determinantes de la presencia o ausencia de gasterópodos en los distintos ambientes. Uno de los factores más limitantes es la cantidad de sales disueltas en el agua, especialmente de carbonato de calcio, que es el material más importante en la construcción de las conchillas de los gasterópodos (Domínguez 2009), dichas condiciones pueden presentarse en el embalse dada la cantidad de poblaciones aledañas a este y que vierten muchas de las aguas servidas en este.

El phylum Arthropoda, si bien está relacionado con carga orgánica y niveles bajos de oxígeno (Roldán y Ramírez, 2008) registró aportes bajos lo que puede atender en gran medida a la capacidad de agregación que tienen los moluscos y su baja tasa de movilidad que facilita una mayor oportunidad de encuentro.

Entre los representantes del phylum Arthropoda se encontraron los dípteros de la familia Chironomidae, la cual cuenta con adaptaciones fisiológicas que le permiten su colonización y éxito en ambientes con carga orgánica importante. Las formas larvales y de pupa se encuentran en cualquier tipo de sustrato ya sea blando, semiblando o duro, sobre vegetación sumergida e incluso



sobre otros organismos. De esta manera su presencia en el embalse es justificada dadas los diferentes tipos de sustratos que allí se pueden encontrar (Domínguez 2009).

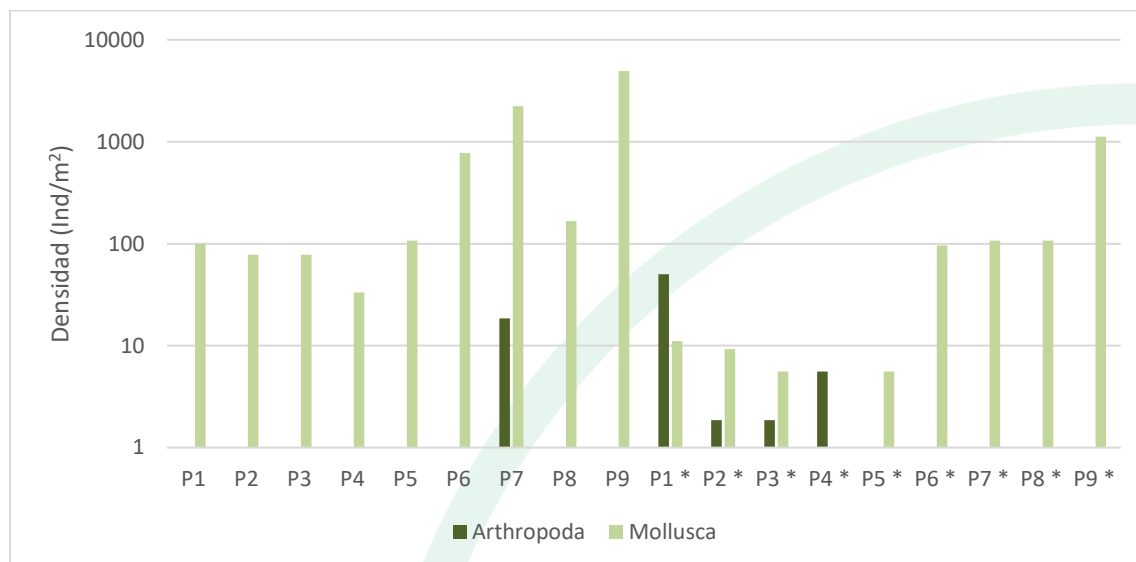


Figura 29. Contribución a la densidad total de los phylum en los puntos de monitoreo en el Embalse del Guájaro. Escala logarítmica.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Dado que la riqueza (Taxa_S) en el embalse del Guájaro fue inferior a cinco (5) en la mayoría de los puntos de monitoreo para las dos campañas no le fueron calculados los índices ecológicos debido a que este número es poco representativo en la estimación de dichos índices, de tal manera que su cálculo resultaría en una sub o sobreestimación de los atributos ecológicos que relacionan los mismos.

Para el P1* dado que presentó 8 morfoespecies se hizo el cálculo como se muestra en la (Tabla 37). Los valores de Shannon-Wiener fueron bajos e inferiores a dos (2) estando relacionado con sistemas de diversidad relativamente baja con efectos de la contaminación, ya que la presencia de una gran variedad de individuos está directamente relacionada con la disponibilidad y amplitud de los recursos (Roldán y Ramírez, 2008); valores superiores a dos (2) indican sistemas con una mayor riqueza que permiten el establecimiento de un mayor número y variedad de individuos mediante



su vasta oferta de recursos; la equidad fue moderadamente alta y congruente con la dominancia, Con respecto a los valores obtenidos para la riqueza específica descrita por el índice de Margalef, los valores aquí calculados fueron ligeramente bajos, ya que valores inferiores a 2 son considerados como zonas de baja riqueza específica y valores por encima de 5 como de alta riqueza.

Tabla 37. Índices ecológicos aplicados a la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en el Embalse del Guájaro

Índice	P8*
Taxa_S	8,00
Individuals	61,10
Dominance_D	0,29
Shannon_H	1,58
Margalef	1,70
Equitability_J	0,76

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

6.1.3.5. Ictiofauna.

Un total de ocho (8) especies de peces fueron reportados en el embalse del Guájaro, durante los dos monitoreos. Estas se distribuyen taxonómicamente en cuatro (4) ordenes e igual número de familias (**Tabla 38**). Las familias Characidae y Cichlidae tuvieron la mayor representación en términos de riqueza, al reportar tres taxones para cada una. Mientras para Mugilidae y Pimelodidae, solo se reportó una especie, para cada una.

Tabla 38. Clasificación taxonómica de las especies ícticas reportadas en el embalse del Guájaro.

Phylum	Clase	Orden	Familia	Morfoespecie
Chordata	Actinopterygii	Characiformes	Characidae	<i>Roeboides dayi</i>
				<i>Astyanax magdalenae</i>
				<i>Astyanax sp.</i>
		Cichliformes	Cichlidae	<i>Oreochromis niloticus</i>
				<i>Andinoacara latifrons</i>
				<i>Caquetaia kraussii</i>
		Mugiliformes	Mugilidae	<i>Mugil liza</i>
		Siluriformes	Pimelodidae	<i>Pimelodus yuma</i>

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



Un total de 75 individuos fueron capturados en el primer monitoreo (M1), de los cuales 14,00Ind pertenecen a la especie *Roeboides dayi*; 15,00Ind a *Astyanax* sp.; 12,00Ind a *Andinoacara latifrons*; y 16,00Ind a *Caquetaia kraussii*. Siendo estas las especies más abundantes, en especial la última mencionada (**Tabla 39**).

La abundancia de *C. kraussii*, puede tomarse como un indicio de la posible existencia de una diversidad mayor de especies de peces en el embalse, ya que esta especie es principalmente piscívora (Atencio-García *et al.*, 2005).

La mojarra amarilla se utiliza en la pesca artesanal en toda la cuenca media y baja del río Atrato (Rivas *et al.* 2002). Además, es una excelente especie deportiva (Castillo y Rubio 1987, Usma 1996). En la ciénaga Grande de Lorica esta especie se ha convertido en reemplazo de las especies tradicionalmente capturadas y de mayor valor comercial, siendo considerada la quinta especie en importancia comercial en la cuenca del río Sinú (Olaya-Nieto *et al.* 2004). Lasso *et al.* (2010) afirman que la especie está entre las diez con mayor comercialización en la ciudad de Quidó.

Tabla 39. Abundancia reportada por las especies ícticas en el embalse del Guájaro durante el monitoreo 1.

Embalse del Guájaro										
Morfoespecie	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Total
<i>Roeboides dayi</i>	3,00	11,00	-	-	-	-	-	-	-	14,00
<i>Astyanax magdalenae</i>	8,00	-	-	-	-	-	-	-	-	8,00
<i>Astyanax</i> sp.	-	15,00	-	-	-	-	-	-	-	15,00
<i>Oreochromis niloticus</i>	-	-	-	-	-	-	5,00	2,00	1,00	8,00
<i>Andinoacara latifrons</i>	12,00	-	-	-	-	-	-	-	-	12,00
<i>Caquetaia kraussii</i>	-	-	-	-	-	3,00	-	7,00	6,00	16,00
<i>Mugil liza</i>	-	-	-	-	-	1,00	-	-	-	1,00
<i>Pimelodus yuma</i>	-	-	-	-	-	-	-	1,00	-	1,00
Total	23,00	26,00	0,00	0,00	0,00	4,00	5,00	10,00	7,00	75,00

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

La mayor abundancia relativa la presento la especie *Oreochromis niloticus* en el punto P7, con valor del 100%, ya que fue la única reportada. Seguidamente la especie *C. kraussii* en el P9 con valor de 85% (**Tabla 40**).



Tabla 40. Abundancia relativa (%) reportada por las especies ícticas en el embalse del Guájaro en el monitoreo 1.

Morfoespecie	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Roeboides dayi</i>	13,04	42,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Astyanax magdalenae</i>	34,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Astyanax sp.</i>	0,00	57,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Oreochromis niloticus</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	20,00	14,29
<i>Andinoacara latifrons</i>	52,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Caquetaia kraussii</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	75,00	0,00	70,00	85,71
<i>Mugil lisa</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,00	0,00	0,00	0,00
<i>Pimelodus yamai</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Para el segundo monitoreo solo fueron reportadas tres (3) especies, de las cuales se destaca la abundancia de *Oreochromis niloticus* con un total de 44 Individuos, que fueron reportados en los puntos P6, P7, P8 y P9 (Tabla 41).

Tabla 41. Abundancia reportada por las especies ícticas en el embalse del Guájaro en el monitoreo 2.

Embalse del Guájaro										
Morfoespecie	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Total
<i>Oreochromis niloticus</i>	-	-	-	-	-	5,00	10,00	16	13,00	44,00
<i>Caquetaia kraussii</i>	-	-	-	-	-	8,00	-	6,00	4,00	18,00
<i>Pimelodus yuma</i>	-	-	-	-	-	2,00	-	-	2,00	4,00
Total	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	10,00	22,00	19,00	66,00

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

En general en los puntos P3, P4 y P5, durante los dos (2) monitoreos, no se reportaron peces. Mientras que en los puntos P1 y P2, durante el primer monitoreo se reportaron las especies *Roeboides dayi*, *Astyanax magdalenae*, *Astyanax sp.* y *Andinoacara latifrons*, pero en el segundo monitoreo no se capturaron individuos.

Tabla 42. Abundancia relativa (%) reportada por las especies ícticas en el embalse del Guájaro en el monitoreo 2.

Embalse del Guájaro									
Morfoespecie	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Oreochromis niloticus</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,33	100,00	72,73	68,42



Embalse del Guájaro									
Morfoespecie	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
<i>Caquetaia kraussii</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	53,33	0,00	27,27	21,05
<i>Pimelodus yuma</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,33	0,00	0,00	10,53

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Garcia-Alzate et al (2016), quien asegura que, debido a infinidad de problemas ambientales y sociales, la riqueza ictica en este emblemático sistema acuático ha disminuido, drásticamente, lo cual ha conllevado a que las poblaciones locales incluyan en sus dietas especies como la mojarrita *C. kraussii*, *Astyanax magdalenae* y/o *Andinoacara latifrons*, entre otras especies de talla pequeña.

Los cambios en la estructura y composición de las comunidades ícticas, durante el año ha sido altamente documentado en diferentes sistemas lenticos y loticos, ya que con el cambio en los periodos hidroclimáticos, y/o el pulso de inundación, las condiciones fisicoquímicas cambian, haciendo así que algunas especies migren, algunas se hagan más abundantes, entre otros comportamientos. En este sentido, el cambio en la riqueza y abundancia de la ictiofauna durante los dos monitoreos, ya que se pasó de ocho (8) taxones y 75,00Ind en el monitoreo 1 (M1); a tres (3) taxones y 66,00Ind, durante el monitoreo 2 M2 (**Figura 30**).



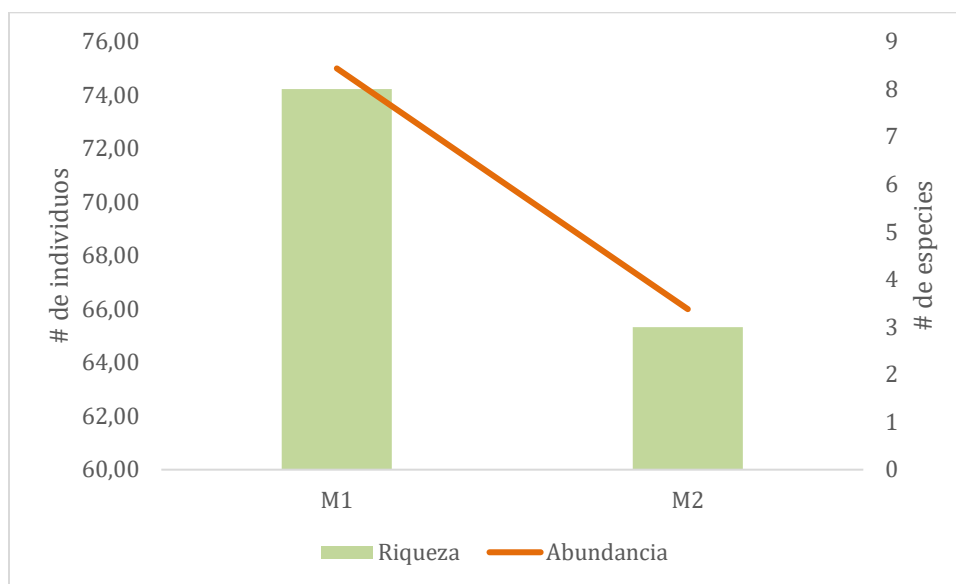


Figura 30. Riqueza y abundancia de la ictiofauna en el embalse del Guájaro en los monitoreos 1 y 2.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Las especies constantes durante los dos monitoreos fueron *P. yuma*, *O. niloticus* y *C. kraussii*, al ser estas las únicas reportadas en los dos monitoreos realizados. La especie más rara, fue la sembrada *Mugil liza*, ya que se reportó solo un individuo solo en el primer monitoreo.

Tabla 43. Constancia de las especies entre los monitoreos realizados.

Morfoespecie	M1	M2	Constancia
<i>Roeboides dayi</i>	1	0	1
<i>Astyanax magdalenae</i>	1	0	1
<i>Astyanax sp.</i>	1	0	1
<i>Oreochromis niloticus</i>	1	1	2
<i>Andinoacara latifrons</i>	1	0	1
<i>Caquetaia kraussii</i>	1	1	2
<i>Mugil liza</i>	1	0	1
<i>Pimelodus yuma</i>	1	1	2
Total	8	3	-

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



6.2. Índice de calidad de aguas – embalse del Guájaro

6.2.1. Selección de parámetros.

La selección de parámetros implicó la revisión de información complementaria sobre normas internacionales e índices de calidad ya establecidos para diferentes cuerpos de agua en Colombia y otros países, además de un análisis de los parámetros con mayor representatividad en los monitoreos que se realizan periódicamente en el embalse y la actual caracterización. Es decir, para la selección de parámetros se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Bibliográfico
- Normativo
- Análisis estadístico multivariado

6.2.2. Criterio bibliográfico.

Se revisó un total de 21 índices de calidad de aguas, sin embargo, solo se tuvieron en cuenta 11 que fueron diseñados para ecosistemas lénticos en zonas tropicales. De estos, se extrajeron los parámetros que tuvieron una frecuencia superior al 30% (**Tabla 45**).

La proporción del porcentaje de corte (30%) para la selección de los parámetros más utilizados se estableció teniendo en cuenta que algunos de los índices analizados fueron planteados para determinados tipos de contaminación, funcionando con un reducido número de parámetros, lo cual hace que varios de estos posean porcentajes de representatividad bajos. En caso que se hubiera tomado un porcentaje mayor, por ejemplo 50%, algunos parámetros de reconocida importancia en la calidad de los cuerpos de agua del departamento del Atlántico, como la DBO₅, SST, PO₄ y NO₃, hubieran quedado por fuera.



Tabla 44. Parámetros de mayor utilización en los índices de calidad de aguas revisados.

Variables	Frecuencia relativa (%)
Oxígeno Disuelto	72,73
pH	72,73
Conductividad	63,64
Turbidez	36,36
DBO ₅	63,64
SST	72,73
Dureza Total	45,45
Alcalinidad	45,45
Coliformes Totales	36,36
Fosfatos (PO ₄)	45,45
Nitratos (NO ₃)	45,45

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

6.2.3. Criterio Normativo.

Se hizo una revisión exhaustiva sobre normatividad vigente de calidad de aguas, tanto nacional como internacional.

A nivel local se tuvo en cuenta la resolución 0000449 de 2021 de la Corporación Regional Autónoma del Atlántico (CRA) donde se establecen los objetivos de calidad para los cuerpos de agua en su jurisdicción. Así mismo, de Colombia utilizó el decreto 1594 de 1984, en particular lo contenido en los artículos 40, 41 y 45, que se refieren a los cuerpos de agua cuyo uso está destinado a las actividades agrícolas, pecuarias y de preservación de flora y fauna, respectivamente.

Se tomaron normas internacionales de 12 países, en su mayoría, tropicales y de ellas se seleccionaron los parámetros cuyo principal objetivo era la preservación de flora y fauna.

En total se encontró que los parámetros de mayor control en las diferentes normas son los 14 que se muestran en la siguiente tabla.



Tabla 45. Parámetros mayormente controlados en la normativa nacional e internacional de calidad de aguas y frecuencia de aparición en las mismas.

Variables	Frecuencia relativa (%)
Arsénico	93,33
Cadmio	86,67
Cobre	93,33
Plomo	86,67
Mercurio	86,67
Oxígeno disuelto	66,67
pH	73,33
DBO ₅	33,33
SAAM	53,33
Grasas y Aceites	60,00
SST	46,67
Amoniaco (NH ₃)	53,33
Nitratos (NO ₃)	40,00
Coliformes Totales	46,67

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

6.2.4. Criterio estadístico.

Teniendo en cuenta la caracterización detallada realizada entre 2021 y 2022, con un total de 33 variables fisicoquímicas, tres variables microbiológicas y seis variables hidrobiológicas, se realizó un análisis estadístico (ACP) para determinar cuáles variables ofrecen mejor explicación a la dinámica del embalse, así como las correlaciones más significativas y grupos de variables relacionadas con una misma condición. Para este análisis multivariado, se incluyeron 31 variables, luego de descartar aquellas que no registraron variabilidad por estar en todos los casos por debajo del límite de detección, principalmente con relación a algunos metales pesados y todos los plaguicidas (organoclorados y organofosforados). También hacen parte algunas variables hidrobiológicas como el fitoplancton, el zooplancton y los macroinvertebrados bentónicos, por su papel como indicador de la calidad del agua. De estos grupos se usaron los valores de abundancias relativas (densidad) y riqueza específica. Adicionalmente para el fitoplancton, se discriminaron los valores de densidad asociada a grupos como Euglenophyta y Cyanophyta por la respuesta de sus componentes a las



condiciones de carga orgánica y productividad, así como por los antecedentes en este cuerpo de agua debido a florecimientos de posibles componentes con capacidad tóxica.

Se incluyeron en el análisis los resultados de los dos momentos correspondientes a la época de aguas altas (diciembre) y a la transición (época seca), con el objetivo de observar la significancia y el peso de los parámetros asociados a la temporalidad. Para ello se tuvo en cuenta los primeros 4 ejes o componentes, debido a que estos representaron más del 70.1% de la varianza acumulada (**Tabla 46**).

Tabla 46. Eigenvalores del análisis de componentes principales (ACP).

Componente	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	10,736	34,632	34,632
2	5,39759	17,412	52,044
3	3,28986	10,612	62,656
4	2,31956	7,482	70,139
5	1,88312	6,075	76,213
6	1,53848	4,963	81,176
7	1,27131	4,101	85,277
8	1,10843	3,576	88,853
9	0,805293	2,598	91,45
10	0,66476	2,144	93,595
11	0,551984	1,781	95,375
12	0,413253	1,333	96,708
13	0,360226	1,162	97,87
14	0,303955	0,981	98,851
15	0,16817	0,542	99,393
16	0,126186	0,407	99,8
17	0,061857	0,2	100

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Posteriormente, con base en la inercia de las variables, los pesos de los componentes (**Tabla 47**) y con ayuda de las gráficas 2D, se escogieron aquellas con mayor incidencia en el ACP, las cuales se espera y se presume, tienen una mayor capacidad de explicar los cambios espacio temporales de las condiciones ambientales y de calidad del agua del embalse de El Guájaró. La **Tabla 47**, muestra, la selección de variables con mayor peso en el análisis (**), teniendo como criterio artificial, la mayor suma de pesos de los componentes en los que las variables mostraron mayor variabilidad, lo que está relacionado con la incidencia de las variables en un mayor número de componentes o dicho de otra manera, se seleccionaron las variables que con mayor frecuencia entre los primeros cuatro



componentes presentaron pesos mayores o iguales a ± 0.2 . Por ejemplo, entre los metales, el arsénico presenta un peso de 0.21 en el primer componente que tiene un 34.63% de la varianza y también aporta con un peso de -0.24 en el cuarto componente cuyo eigenvalor aporta un 7.482% a la varianza; sumando los porcentajes, el resultado para estos dos componentes es de 42.1% de la varianza, lo que le da mayor relevancia a este metal sobre otros más representativos en componentes de poco peso en la inercia del análisis.

Tabla 47. Peso de las variables en los componentes. *: Peso de las variables en cada componente ≥ 0.2 **: Suma de los pesos de los componentes en los que las variables tienen mayor inercia ≥ 34.63

Peso del componente	34,632	17,412	10,612	7,482	Suma pesos componentes en los que es representativa la variable
Variable	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4	
SST	0,105457	0,261156	-0,0615159	-0,278844 *	24,89
As	0,212932 *	-0,0408848	-0,0513157	-0,247419 *	42,1 **
COND	0,180692	0,22411	0,033933	-0,243013 *	24,89
pH	0,10074	0,141184	-0,0878896	-0,218871 *	7,42
MacroID	0,112879	0,0746415	0,348596 *	-0,199015	10,61
OD	0,22745 *	0,0263192	-0,111714	-0,156478	34,63 **
SO4	0,274569 *	-0,069715	-0,0414824	-0,101983	34,63 **
ZooD	-0,168081	0,0180228	0,24943 *	-0,02413	10,61
Cla	-0,0901678	0,327937 *	0,15431	-0,0171605	17,41
ZooR	-0,226712 *	-0,142643	0,168488	-0,0140487	34,63 **
fito D	0,250612 *	0,148771	-0,0562403	-0,00605872	34,63 **
Cy D	0,249341 *	0,155324	-0,0540931	-0,00330116	34,63 **
DQO	0,253895 *	-0,0147915	0,266944 *	0,0168889	45,24 **
TRANSP	0,177774	-0,305215 *	-0,126791	0,0205368	17,41
DUREZACAL	0,276355 *	-0,137567	-0,0809929	0,0377142	34,63 **
Eug	0,0481106	0,046197	0,45351 *	0,0659539	10,61
DBO5	0,236349 *	-0,0432049	0,296586 *	0,0795567	45,24 **
CT	0,186771	-0,189287	0,224597 *	0,0884177	10,61
PT	0,252762 *	0,00231753	0,12935	0,105976	34,63 **
DUREZAT	0,231632 *	0,201265 *	0,11692	0,112789	527. LISTADO DE
Fito R	-0,153656	-0,226568 *	0,231906 *	0,11802	28,024
CTT	0,175189	-0,270412 *	0,0279287	0,158712	17,41
Pseud	0,129318	0,0116118	-0,274974 *	0,163568	10,61
PO4	0,207159 *	-0,199745	-0,0367936	0,16481	34,63 **
NO2	-0,114739	0,281836 *	0,146664	0,225081 *	24,89
SDT	0,153815	0,197922	0,198664	0,273486 *	7,48
MacroIR	0,00902489	-0,107694	-0,0700718	0,322217 *	7,48
Cu	0,0309732	0,278666 *	-0,11926	0,372047 *	24,89
Zn	0,0249478	0,263423 *	-0,196763	0,39884 *	24,89

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



El gráfico 2D, muestra condiciones espacio temporales que se pueden discriminar bien en el análisis, dando evidencia de características discriminantes y variaciones importantes entre una temporada y otra y entre las estaciones, por ejemplo, las diferencias espaciales en las condiciones del embalse, se representan mejor en el primer componente para el monitoreo de enero o inicio de la temporada seca y sobre el segundo componente para el muestreo de diciembre cuando las aguas del embalse estaban en su mayor profundidad por la temporada de lluvias aún muy activa.

La mayor representatividad está hacia las estaciones extremas de norte a sur, indicando un gradiente importante, que es favorecido por el tipo de terreno, las actividades productivas, la forma del embalse y los intercambios que se dan en su mayor parte hacia el sur del cuerpo de agua, donde ingresan y salen las aguas desde y hacia el Canal del Dique, que es la principal fuente de llenado de este sistema.

Hacia el norte (estaciones P7, P8 y P9), tanto en el primero como en el segundo componente existe afinidad con aguas de mayor dureza (cálcica y total) en un gradiente que va hacia el sur y en niveles que indican gran capacidad de amortiguación lo que se explica por la naturaleza del terreno (García et al., 2016).

Algunas variables de importancia desde el punto de vista de la calidad del agua y que suelen ser evidentes en los procesos de caracterización son las que tienen que ver con la carga orgánica y son determinantes en los procesos de evaluación de la trayectoria de un ecosistema y la intensidad de las actividades antrópicas. De estas variables, la DBO₅ y DQO son algunas de las más conocidas y utilizadas. Estas variables se encuentran bien representadas en el primer componente, asociándose positivamente hacia las estaciones del norte del embalse y de manera inversa, es decir, los valores más bajos hacia las estaciones del sur (P1, P2 y P3), lo cual persiste a través del análisis inclusive en los componentes tres y cuatro, indicando un gradiente asociado a esta variable, tal como se identifica por García et al.,(2016) y en otros monitoreos realizados por la CRA, posiblemente con relación al vertimiento de aguas servidas por parte de las poblaciones ubicadas a orillas del embalse.



Este gradiente es acompañado por el fósforo total (PT) y los fosfatos (PO_4), cuya mayor representatividad se encuentra hacia el norte y sobre todo la parte media del embalse en particular hacia el punto 6 donde se encuentra el corregimiento de Rotinet.

Por otra parte, el oxígeno disuelto (OD) presentó también una representatividad significativa en el primer componente y a pesar de la alta carga orgánica, tuvo una relación directa en el análisis con las variables que se relacionan con su consumo, DBO_5 y DQO; sin embargo la carga orgánica podría propiciar la relación inversa con el OD en horas de oscuridad y crepusculares con aumento en el consumo de este gas, teniendo en cuenta que los resultados corresponden con mediciones realizadas en horario diurno, cuando la producción es muy alta como consecuencia de la carga de nutrientes y las altas tasas fotosintéticas, lo cual se evidencia en valores extremos de OD que en algunos puntos, en especial al norte del embalse y en la segunda campaña de enero de 2022, detectándose valores de sobresaturación de hasta 16.1 mg/L.

Este gradiente de norte a sur también es seguido por aniones importantes como los sulfatos (SO_4) cuya afinidad más evidente se observa en el primer componente hacia las estaciones más al norte con relación al monitoreo de época seca y se mantiene con mayor discreción con respecto a los resultados del mes de diciembre cuando aún se extendían las lluvias y los altos niveles del Canal del Dique. Una distribución similar es seguida entre los metales pesados por el arsénico (As).

Entre las variables hidrobiológicas, la densidad del fitoplancton (FitoD) presentó la mayor representatividad con relación a las estaciones P7 y P8 al norte del embalse, en ambos periodos, lo cual se aprecia en el eje positivo del primer componente del análisis, siguiendo un gradiente similar a las otras variables comentadas y de manera sostenida para las dos épocas climáticas, aunque con más fuerza hacia el monitoreo del mes de enero lo cual puede estar relacionado con la mayor disponibilidad de micronutrientes y sales necesarias para su crecimiento. La densidad de cianobacterias (CyD) sigue casi la misma tendencia debido a que el fitoplancton estuvo representado en más de un 90% por este grupo, lo cual puede estar indicando desbalances N:P. De hecho, de acuerdo con los datos y empleando las concentraciones de las formas inorgánicas, se encontró una



relación general N:P fue de 1.6, lo cual es más bajo que la relación propuesta por Vollenweider (1981) y usada por Salas y Martino (2001) del CEPIS, que es de 9:1, poniendo al fósforo como el elemento limitante. Esta condición que favorece el crecimiento de cianobacterias, teniendo en cuenta que este grupo se caracteriza por la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico para sus procesos metabólicos. Este grupo, las cianobacterias, resultan de importancia en el análisis, debido a los antecedentes en el embalse de posibles florecimientos de taxa con actividad tóxica para animales domésticos. Además, la dominancia de diferentes grupos del fitoplancton se relaciona con su estado trófico, en el caso de las cianobacterias, se asocia con cuerpos de agua eutróficos (Margalef, 1983; Paerl, 1988; Lampbert y Summer, 1997; Scheffer et al. 1997; González et al., 2003). No obstante, otros factores como la alcalinidad pueden favorecer el desarrollo de cianobacterias (Margalef, 1983). También los altos valores de pH pueden favorecer a los componentes de este grupo, por su capacidad de transformar iones carbonato y bicarbonato en CO_2 (Hernández et al., 2016).

De manera opuesta, la riqueza del zooplancton (ZooR) es la otra variable hidrobiológica, que contradice la distribución presentada por las demás variables. La dominancia de cianobacterias, más intensa al norte del embalse determina cierta homogeneidad en los recursos (tamaño, forma y nutrientes) que proveen las diferentes especies del fitoplancton a disposición del zooplancton, que responde, mejor en variedades y adaptaciones en presencia de aguas con mayor variedad fitoplanctónica, como se puede observar por la afinidad de la riqueza del zooplancton y del fitoplancton, hacia las estaciones del sur del embalse para los dos períodos monitoreados.



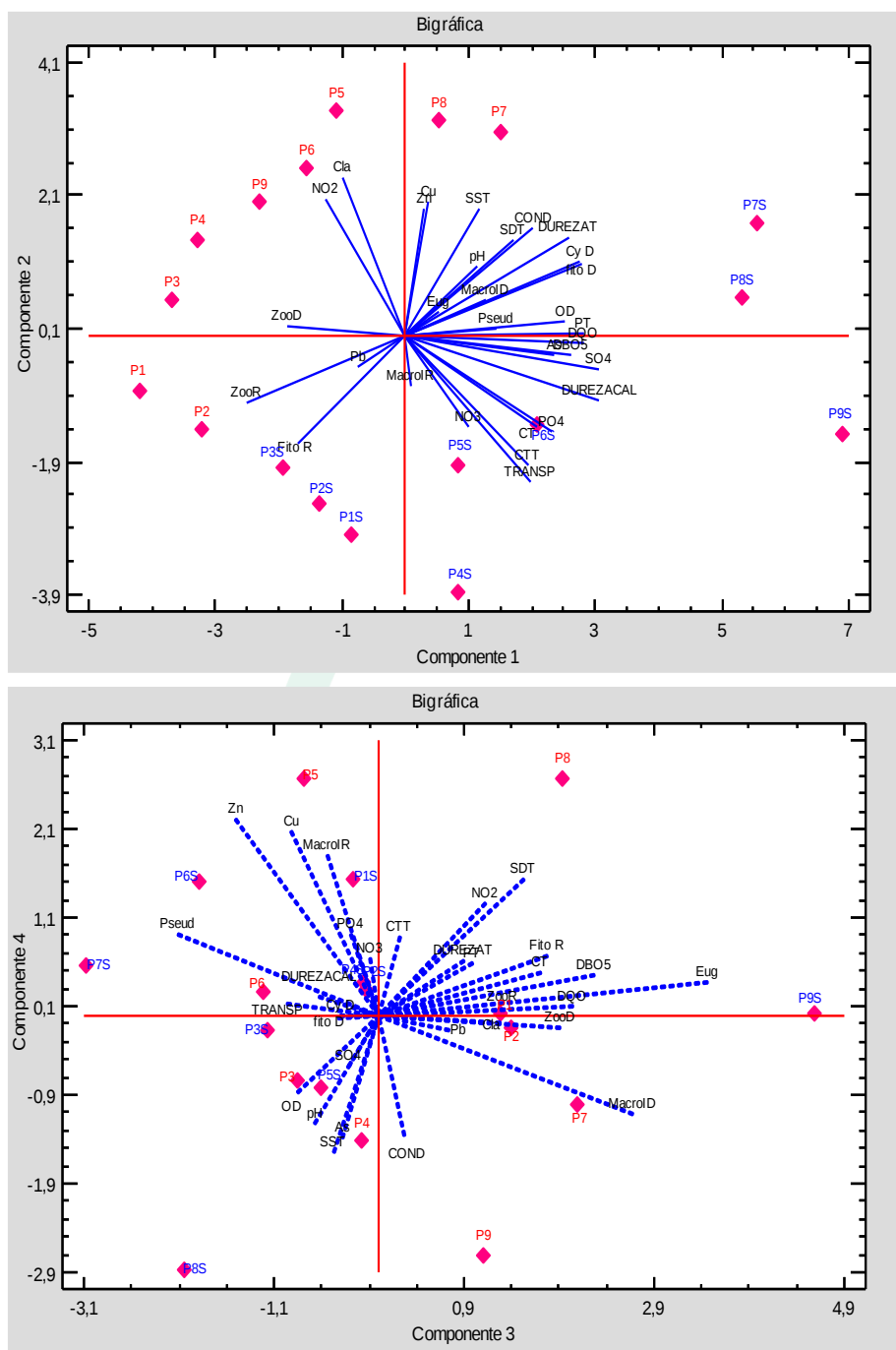


Figura 31. Gráfico 2D del ACP para las variables de calidad de agua del embalse del Guájaro. P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9: periodo de lluvia. P1S, P2S, P3S, P4S, P5S, P6S, P7S, P8S, P9S: Periodo seco.

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



Teniendo en cuenta el anterior análisis, la **Tabla 48**, contiene las variables seleccionadas mediante el criterio estadístico debido a su mayor inercia o representatividad en el ACP.

Tabla 48. Variables seleccionadas a partir del análisis de componentes. ZooR: Riqueza del zooplancton; fito D, Densidad del fitoplancton; C y D: Densidad de Cyanophytas.

Fisicoquímicas	Hidrobiológicas
As	ZooR
SO4	fito D
DQO	Cy D
DUREZACAL	
DBO5	
PT	
DUREZAT	
PO4	
OD	

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Estas variables fueron analizadas desde el punto de vista de la condición que representan y con base en el análisis de correlaciones momento producto de Pearson (Anexo xxx1). Este último análisis mide la fuerza de la relación lineal entre las variables (-1 a +1) y la representatividad de las correlaciones significativamente diferentes de cero (0) con un 95% de confianza cuando el valor P es < 0.05 . De este análisis se obtuvo la siguiente tabla, en la que se muestran las correlaciones con mayor significancia y con mayor fuerza ($> \pm 0.6$).

Tabla 49. Correlaciones de Pearson más significativas entre las variables.

Variables correlacionadas	Fuerza de la correlación ($p < 0,05$)	Variables correlacionadas	Fuerza de la correlación ($p < 0,05$)
As y Cy D	0,61	DUREZAT y SDT	0,68
As y fito D	0,62	DUREZAT y ZooR	-0,66
COND y DUREZAT	0,64	fito D y Cy D	0,99
COND y Fito R	-0,63	fito D y ZooR	-0,69
COND y MacroID	0,62	Fito R y ZooR	0,69
COND y SST	0,65	NO2 y Cla	0,63
COND y ZooR	-0,62	OD y As	0,73
CT y CTT	0,82	OD y Cy D	0,73
Cu y Zn	0,9	OD y DUREZACAL	0,617



Variables correlacionadas	Fuerza de la correlación (p<0,05)	Variables correlacionadas	Fuerza de la correlación (p<0,05)
Cy D y ZooR	-0,69	OD y fito D	0,72
DBO5 y CT	0,77	OD y PT	0,64
DBO5 y DQO	0,97	OD y SO4	0,71
DBO5 y DUREZACAL	0,67	PO4 y CT	0,67
DBO5 y DUREZAT	0,69	PO4 y CTT	0,84
DBO5 y PT	0,71	PO4 y NO3	0,6
DBO5 y SO4	0,69	PO4 y PT	0,65
DQO y CT	0,72	PT y Cy D	0,73
DQO y DUREZACAL	0,71	PT y fito D	0,74
DQO y DUREZAT	0,74	PT y SDT	0,61
DQO y PT	0,79	SO4 y As	0,73
DQO y SO4	0,71	SO4 y CT	0,64
DUREZACAL y As	0,65	SO4 y CTT	0,6
DUREZACAL y CT	0,61	SO4 y Cy D	0,68
DUREZACAL y CTT	0,67	SO4 y fito D	0,68
DUREZACAL y Cy D	0,61	SO4 y ZooR	-0,64
DUREZACAL y fito D	0,63	SST y Fito R	-0,72
DUREZACAL y PO4	0,77	TRANSP y Cla	-0,87
DUREZACAL y PT	0,7	TRANSP y CTT	0,73
DUREZACAL y SO4	0,86	TRANSP y DUREZACAL	0,81
DUREZACAL y ZooD	-0,65	TRANSP y NO2	-0,73
DUREZACAL y ZooR	-0,61	TRANSP y PO4	0,7
DUREZAT y Cy D	0,77	TRANSP y SO4	0,63
DUREZAT y fito D	0,76	ZooR y ZooD	0,67
DUREZAT y PT	0,77		

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.

Con base en este análisis, de la **Tabla 48**, se seleccionaron 5 variables asociadas a diferentes condiciones sobre a calidad del agua del embalse, estas son arsénico (As), Oxígeno disuelto (OD), Dureza total (DUREZAT), DBO₅ y densidad de cianofíceas (CyD).

Entre los metales pesados, el arsénico (As) presentó la mayor variabilidad y concentraciones detectables. Adicionalmente este metaloide registró correlaciones significativas, pero inversas que indican algún efecto sobre grupos biológicos donde puede causar toxicidad, específicamente con la densidad (-0.51) y riqueza del zooplancton (-0.56) (Ver Anexo xxx1). No obstante, las concentraciones registradas de Arsénico en aguas del Guájaro están muy por debajo de niveles letales y subletales, que en general se encuentran alrededor de 1 mg/L.



Entre las condiciones básicas del embalse se seleccionó el oxígeno disuelto (OD) además de su variabilidad por ser indicador por defecto de las condiciones del medio con destinación para preservación de flora y fauna, y por ser testigo de condiciones críticas relacionadas con el estado trófico y salud del ecosistema. Así mismo, la dureza total (DUREZAT), se selecciona como indicador de las condiciones elementales de salud del sistema, por ser un indicador del estrés osmótico por su relación con las sales y los gradientes típicos en el embalse.

Entre las variables indicadoras del contenido de materia orgánica, se priorizó la DBO₅, porque además del peso en el ACP, es una variable que tiene antecedentes en el uso como indicador de calidad de agua, además las otras variables presentan con esta y entre sí, fuertes correlaciones, por lo que incluirlas en el índice, sobreestimarían su valor. Por otra parte, resulta de utilidad, por esta fuerte correlación, como variable representativa de la contaminación orgánica, lo que simplifica la valoración de este tipo de contaminación con una variable muy significativa.

Por último, entre las variables relacionadas con la productividad, se seleccionó la densidad de Fitoplancton, por ser una variable bien estudiada y con mayor disponibilidad de información en términos generales. Sin embargo, debe tenerse en cuenta para la interpretación de los resultados, la proporción de cianofíceas, dominantes en el sistema. Las cianofíceas deben vigilarse directamente por los antecedentes en este cuerpo de agua con relación a posibles florecimientos de componentes tóxicos en este grupo, que han causado episodios de toxicidad sobre peces y animales domésticos en el pasado. También se encontraron correlaciones significativas que indican que las cianofíceas influyen en la dinámica de otros grupos bióticos.

Tabla 50. Correlaciones seleccionadas mediante criterio estadístico.

Variable	Condición
As	Metales pesados
Oxígeno disuelto	Condiciones básicas del medio
Dureza Total	
DBO ₅	Materia orgánica
FitoD	Productividad



6.2.5. Consolidado de variables seleccionadas.

Se agruparon las variables obtenidas por los diferentes criterios y se excluyeron aquellas con menor frecuencia, las que presentan una alta correlación y se asocian al mismo fenómeno o condición, las que presentaron menor peso en el ACP, las que resultan inviables de analizar (costos o exigencias técnicas) y las que no registraron concentraciones detectables o no representan históricamente una variación de importancia desde el punto de vista ambiental y la calidad del agua (en particular metales pesados). A pesar de esto último, los metales pesados, aunque en el análisis presentan poca variabilidad, se mantuvieron en la selección, debido al significado crítico en la calidad del agua. Este análisis dio como resultado la selección consolidada de 15 variables, que fueron agrupadas de acuerdo a la condición relacionada como se muestra en la **Tabla 51**.

Tabla 51. Consolidado de variables y agrupación de acuerdo con la condición relacionada.

Condición relacionada	Variable	Criterio bibliográfico	Criterio Normativo	Criterio estadístico
Concentración de metales y metaloides	Arsénico		X	X
	Cobre		X	
	Plomo		X	
Condiciones del medio	Dureza Total	X		X
	Oxígeno Disuelto	X	X	X
	pH	X	X	
	SST		X	
MO y condiciones microbiológicas	DBO ₅	X	X	X
	Coliformes Totales	X	X	
Contaminación residual	Grasas y Aceites		X	
	SAAM		X	
Productividad	Fito D			X
	Fosfatos (PO ₄)	X		
	Nitratos (NO ₃)	X	X	

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S., 2022.



6.2.6. Construcción del índice y curvas de calidad.

El desarrollo de las curvas de calidad se realizó asignando valores de calidad a diferentes concentraciones, teniendo en cuenta una escala de 0 a 100, siendo 100 la calidad óptima y 0 la calidad más baja. Estos valores de la escala se distribuyeron en rangos de calidad.

Los valores en la escala para cada variable seleccionada tuvieron en cuenta, los resultados del monitoreo, la normativa nacional (Dec. 1594/1984) en particular lo contenido en los artículos 40, 41 y 45, que se refieren a los cuerpos de agua cuyo uso está destinado a las actividades agrícolas, pecuarias y de preservación de flora y fauna, respectivamente, los objetivos de calidad para los cuerpos de agua de la subcuenca (resolución 449/2021 de la C.R.A.) y otras normativas aplicadas a sistemas continentales de otros países como Ecuador (Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua), Argentina (Desarrollos de niveles guías nacionales de calidad de agua ambiente, 2004), Venezuela (Normas oficiales para la calidad del agua. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos), Canadá (CCME), U.S.A. (EPA), Chile (CONOMA), Uruguay (Decreto 253/979), México (Acuerdo CE-CCA001/89), Perú (Decreto Supremo 002-2008-MINAM), República Dominicana Norma ambiental de calidad de aguas superficiales y costeras, 2012), España (Real Decreto 817/2015), los desarrollados o aplicados por Ramírez et al (1997) y Ramírez et al (1999), IDEAM, Montoya et al., (1997), Rojas (1991), Castellanos (2002), Torres-Vega (2009), García-Quevedo (2012), De la Hoz-Jiménez (2017), Ariza y Avendaño (2017), Serna-Mosquera (2018), Calvo-Brenes (2019), entre otras publicaciones.

Las curvas de calidad y las respectivas expresiones matemáticas se obtuvieron a partir del software CurveExpert 1.4, seleccionando diferentes modelos en cada caso, teniendo como criterio el mayor coeficiente de regresión, que estuvo entre 0.97-0.99 en la mayoría de los casos.

Las variables fueron agrupadas en subíndices de acuerdo con el aspecto o condición de la calidad ambiental afectada y de la dinámica de las ciénagas, de la siguiente manera:



6.2.6.1. Subíndice concentración de metales pesados.

En Colombia, el uso indiscriminado de metales pesados en actividades mineras, el vertimiento de aguas servidas, el uso de compuestos químicos en actividades ilícitas, el vertimiento de compuestos relacionados con actividades industriales y las prácticas agrícolas inadecuadas, ha llevado a que la contaminación química en especial por metales pesados, constituya un serio problema ambiental debido a su toxicidad, tanto para los ecosistemas acuáticos, como para los organismos que los habitan.

Para la construcción de este subíndice se tuvo en cuenta el arsénico, el cobre y el plomo, de acuerdo a la frecuencia de su uso en diferentes normativas de unos 10 países consultados, entre los cuales Chile, Argentina, Uruguay, Perú, Canadá y Estados Unidos, tiene criterios específicos para la preservación de fauna y flora en sistemas acuáticos. También se tuvo en cuenta algunas referencias como la de Torres-Vega (2009) en el desarrollo de un índice de Calidad para ríos de Puerto Rico y también la representatividad estadística en el respectivo análisis para el embalse de El Guájaro, durante el monitoreo realizado entre dic/2021 y enero/2022.

De estos metales, el Arsénico (As) es un tóxico natural de preocupación mundial. Como elemento se encuentra en la atmósfera, los suelos, en las aguas naturales y en los organismos vivos. Se moviliza en el medio ambiente a través de los niveles tróficos gracias a la combinación química con otros elementos, que sirven para producir actividad biológica. Su procedencia principalmente obedece a emisiones volcánicas, así como al desarrollo de actividades antropogénicas específicas como la minería, la combustión de combustibles fósiles, el uso de pesticidas, herbicidas y el curado de maderas (Welch et al., 1994).

En aguas superficiales y subterráneas el arsénico se encuentra respectivamente en forma de Arsenato (valencia As+5) y Arsenito (valencia As+3) respectivamente. El arsénico en estas aguas es captado para el abastecimiento de poblaciones y por ende uno de los usos más comunes es el consumo humano; denotando ante una concentración elevada de dichas especies químicas, una serie de efectos adversos en la salud, asociados principalmente al contacto prolongado, provocando



un envenenamiento progresivo que da pie a la enfermedad conocida como hidroarsenicismo crónico (Villalobos, 2011).

El arsénico es considerado como una toxina esencial porque se requiere en cantidades muy pequeñas para el crecimiento y el metabolismo, pero en concentraciones relativamente altas resulta tóxico (Krumova et al., 2008). En general los efectos de los metales pesados en organismos como los peces, se manifiestan afectando la tasa de crecimiento, funciones fisiológicas, reproducción, y mortalidad. Estos pueden ingresar a través de tres vías: branquias, tracto digestivo y por la piel. Siendo las branquias la principal vía de ingreso (Shafaqat et al., 2014). El arsénico afecta los parámetros hematológicos, bioquímicos e ionoregulatorios de los seres vivos Kumari et al., 2016). Las exposiciones continuas a bajas concentraciones dan como resultado la bioacumulación en organismos como los peces, acumulándose en órganos como el hígado y riñones.

En cuanto al cobre y el plomo, son metales, que se han relacionado con la coagulación de moco en la superficie de las agallas de los peces y consecuentemente fallas en la respiración (Authman et al., 2015).

El cobre es un elemento que se encuentra en todos los organismos como microcomponente. Es necesario para el metabolismo normal de muchos organismos vivos. Es un micronutriente esencial, necesario para las plantas a niveles muy bajos. Sin embargo, a valores altos resulta tóxico debido a su unión con la membrana celular, que impide el transporte a través de la pared de la célula (Safavi et al., 2001).

La exposición de especies acuáticas al cobre puede provocar la muerte u otros efectos adversos como reducción del crecimiento o debilitamiento de la reproducción, puesto que afecta a sistemas múltiples interfiriendo en procesos bioquímicos específicos (enzimas) y/o membranas celulares o de orgánulos (Díaz, 2007).



El plomo, junto con el arsénico, son algunos de los metales considerados de mayor toxicidad para las especies animales y el ambiente (Pandey y Madhuri, 2014). El plomo, a través de una toxicidad aguda, genera en los peces efectos hematológicos con mortalidad temprana de células rojas maduras en la sangre y también genera efectos neurológicos que incluyen el deterioro del comportamiento de aprendizaje, oscurecimiento de la región caudal y eventualmente curvaturas espinales (Martínez et al., 2004).

A partir del consenso bibliográfico, normativo y estadístico, a continuación, se registran las respectivas curvas de calidad para el arsénico, cobre y plomo en el embalse de El Guájaro.

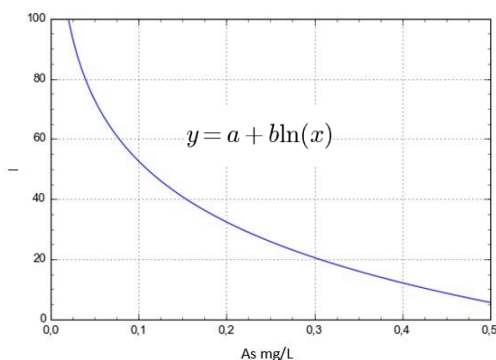


Figura 32. Curva de calidad para el arsénico. a = -14,533155 b = -29,140583 coeficiente de correlación (r)=0,96

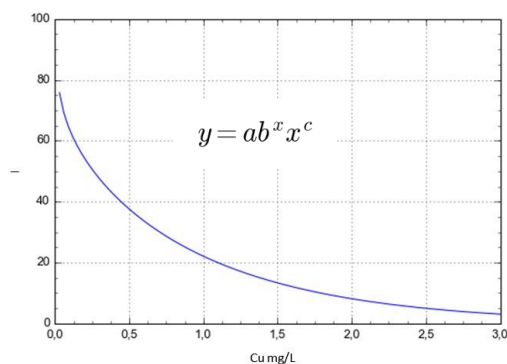


Figura 33. Curva de calidad para el cobre. a = 56,194966 b = 0,393245, c = -0,093303 coeficiente de correlación (r)=0,98

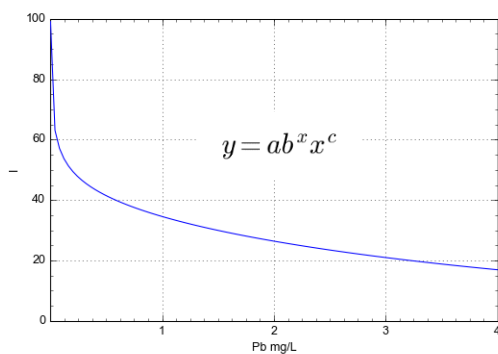


Figura 34. Curva de calidad para el plomo. a = 41,144071 b = 0,839871, c = -0,136524 coeficiente de correlación (r)=0,89



6.2.6.2. Subíndice condiciones básicas del medio.

Las variables seleccionadas para la construcción de este índice fueron el oxígeno disuelto (OD), el pH y los sólidos suspendidos totales (SST). Para cada variable se hizo un consenso a partir del criterio estadístico, diferentes normas, regionales, nacionales e internacionales, así como el desarrollo de índices similares aplicados a calidad de aguas naturales a nivel nacional y regional, incluyendo el ICAcc aplicado a la ciénaga El Rincón y los resultados del monitoreo realizado entre diciembre/2021 y enero/2022.

Algunas de las fuentes de información para construir el consenso, se relacionan con normas asociadas a la conservación de fauna, flora y ecosistemas continentales, entre estas la norma de calidad de aguas y descarga de efluentes al recurso agua de Ecuador, normas oficiales para la calidad del agua. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos de Venezuela, Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), la USEPA, Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para las aguas continentales, superficiales y marinas de Chile, Decreto 253/979. Norma para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas de Uruguay, el acuerdo CE-CCA001/89 por el cual se establecen los criterios ecológicos de calidad de aguas de México, la norma ambiental de calidad de aguas superficiales y costeras de República Dominicana, el Decreto Supremo 004-2017-MINAM de Perú, el Real Decreto 817/2015. B) APARTADO: LAGOS. L-T25 Interior en cuenca de sedimentación, de origen fluvial, tipo llanura de inundación, mineralización alta o muy alta de España, el Decreto 1594/84 del ministerio de Agricultura de Colombia y la Resolución de Objetivos de Calidad 0000449 de 2021 de la CRA.

Para el caso del oxígeno disuelto adicionalmente se consultaron algunas fuentes de información relativas a los efectos de la sobresaturación de oxígeno, Suplee y Lightner (1976), Weitcamp y Katz (1980), Elston (1983), Bohl (1997), Maynrad (2008), teniendo en cuenta que bajo ciertas circunstancias, los niveles altos de este gas disuelto en el agua pueden producir efectos adversos en los organismos, particularmente por la enfermedad de la burbuja o embolia gaseosa. No obstante,



los efectos asociados a la sobresaturación de oxígeno deben ser mejor estudiados, teniendo en cuenta la presión parcial de este gas y otros de importancia en el balance total como el nitrógeno. Se incluyó en el consenso los resultados del monitoreo entre diciembre/2021 y enero/2022, además de los análisis de aguas durante un evento de mala calidad (09/2019), asociado a muerte de reses presumiblemente por consumo de agua durante un bloom de cyanobacterias, durante el cual se registraron valores extremos de anoxia y sobresaturación de oxígeno.

También se tuvo en cuenta otros índices como el UWQI (Universal Water Quality Index) basado en la normativa europea, Ramírez et al (1997) y Ramírez et al., (1999).

Como resultado, a continuación, se registran las respectivas curvas de calidad y sus formulaciones, para el embalse de El Guájaro.

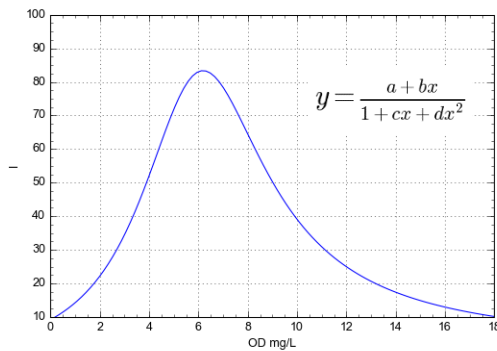


Figura 35. Curva de calidad para el oxígeno disuelto. a= 9,176524 b= 1,567826 c= -0,268813 d= 0,023240 coeficiente de correlación (r)=0,88

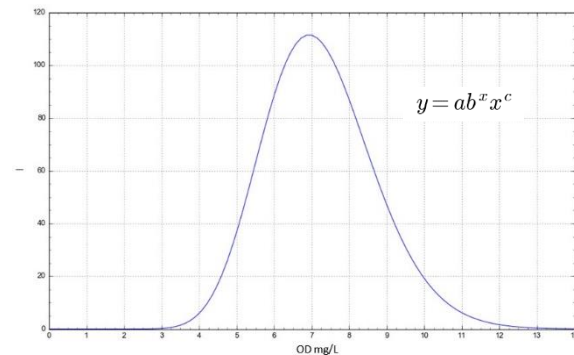


Figura 36. Curva de calidad para el pH. a= 0,0000000445812 b= 0,0355519, c= 23,123719 coeficiente de correlación (r)=0.94



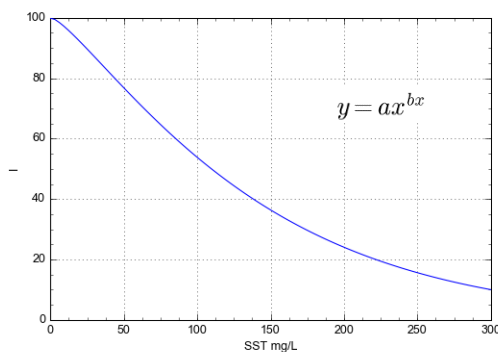


Figura 37. Curva de calidad para los sólidos suspendidos totales. $a= 99,851338$ $b= -0,00134323$, coeficiente de correlación $(r)=0.97$

6.2.6.3. Subíndice Materia orgánica y condiciones microbiológicas en la columna de agua.

Se incluyó en este aspecto la DBO5 (mg/L) y coliformes totales (NMP/100 mL) como medidas de la carga orgánica y microbiológica, y por su relación con la descarga de aguas residuales, que generalmente afectan en buena medida estas condiciones de los cuerpos de agua naturales. Estas variables se encuentran entre las más generalizadas en la normativa nacional, internacional y en la aplicación de otros índices de calidad o de contaminación. Además, son fáciles de determinar.

Los valores asignados a la escala para construir el consenso y las respectivas curvas de calidad incluyen, la normativa nacional (Res. 1594/84), los objetivos de calidad propuestos por la C.R.A. para los cuerpos de agua de la subcuenca (Resolución 0000449/2021), los indicadores propuestos por Ramírez et al. (1997), el ICAcc para la ciénaga Rincón desarrollado para la C.R.A (2017), el índice de León (1991), el UWQI (Universal Water Quality Index) basado en la normativa europea, los resultados del monitoreo del embalse entre diciembre/2021 y enero/2022, la norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua de Ecuador, la Guía CONAMA para el establecimiento de normas secundarias de calidad ambiental para aguas superficiales continentales y marinas de Chile, el Decreto Supremo 002-2008-MINAM de Perú y el acuerdo CE-CCA001/89, por el cual se establecen los criterios ecológicos de calidad de aguas de México.

De acuerdo con lo anterior, se registran las curvas de calidad de DBO5 y Coliformes totales para el embalse de El Guájaro y las respectivas formulaciones.



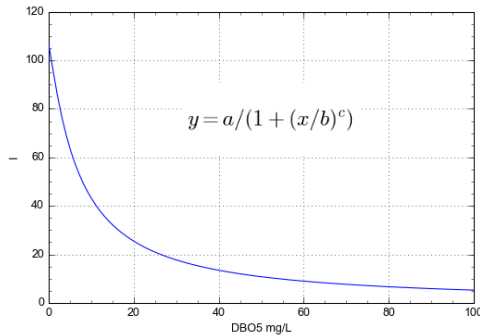


Figura 38. Curva de calidad para la DBO5. a= 105,888345 b= 7,122255 c= 1,117340 coeficiente de correlación (r)=0,98

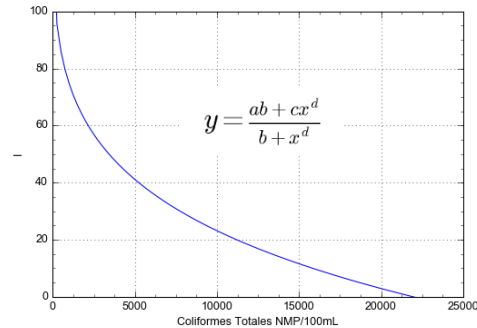


Figura 39. Curva de calidad para los coliformes Totales. a= 146,829078 b= 55,420159, c= - 536,852998, d= 0,271930, coeficiente de correlación (r)=0.98

6.2.6.4. Subíndice de contaminación residual.

Este aspecto se refiere a la contaminación con aguas residuales y su contenido diferente a la carga orgánica. Las variables seleccionadas fueron los detergentes (SAAM) y las grasas y aceites (G y A). Los valores asignados a la escala para la construcción de las respectivas curvas de calidad incluyeron los objetivos de calidad propuestos por la C.R.A. para los cuerpos de agua de la subcuenca (Resolución 0000449/2021), el ICAcc de la ciénaga Rincón desarrollado para la C.R.A (2017), la Guía CONAMA para el establecimiento de normas secundarias de calidad ambiental para aguas superficiales continentales y marinas de Chile, el Decreto Supremo 002-2008-MINAM de Perú, el acuerdo CE-CCA001/89, por el cual se establecen los criterios ecológicos de calidad de aguas de México y normas para la prevención de la contaminación ambiental de Uruguay (Decreto 253/79 incluyendo las modificaciones 232/88, 698/89 y 195/91).

A continuación, se registran las curvas de calidad y la formulación respectiva, con base en el consenso a partir de las fuentes relacionadas anteriormente e incluyendo el análisis de los resultados del monitoreo del embalse de El Guájaro entre diciembre/2021 y enero/2022.



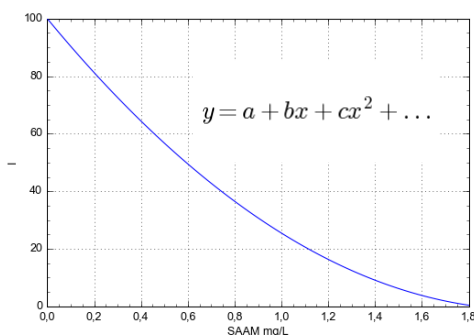


Figura 40. Curva de calidad para los detergentes (SAAM). $a = 99,963862$, $b = -98,495035$, $c = 23,996120$ coeficiente de correlación $(r) = 0,916$

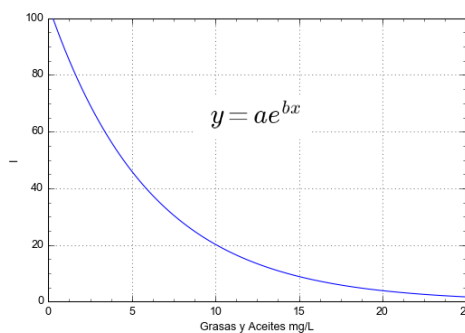


Figura 41. Curva de calidad para Grasas y Aceites. $a = 104,501212$, $b = -0,164195$, coeficiente de correlación $(r) = 0,84$

6.2.6.5. Subíndice de productividad.

La productividad primaria es un reflejo del proceso fotosintético llevado a cabo por los organismos autótrofos para la síntesis de materia orgánica, mediante la transformación de energía lumínica en energía química, siendo el punto de partida de la circulación de la energía y nutrientes en la red trófica. Este fenómeno puede ser determinado por variables que la causan como los nutrientes, principalmente el fósforo, a través de los efectos ocasionados como las densidades fitoplanctónicas o variables conexas como la medición de la transparencia (Ramírez y Viña, 1998). También el nitrógeno juega un papel importante y aunque el exceso de estos nutrientes promueve la eutrofia en los sistemas acuáticos por sobreproducción, cabe resaltar que la relación N/P también resulta determinante, ya que bajo ciertas circunstancias el balance puede romperse a favor de uno u otro elemento, considerándose que el equilibrio para el fitoplancton es en términos generales 9/1. Cuando esta relación disminuye y el nitrógeno se considera limitante, se promueve la presencia de grupos planctónicos como las cianobacterias, entre las cuales algunas tienen el potencial de sintetizar toxinas perjudiciales para la fauna que vive en el cuerpo de agua y los animales que consumen el agua incluyendo el ganado. A partir de los datos del monitoreo, se determinó, que esta relación en el embalse, tomada a partir de las formas inorgánicas del N y P, tiende a ser limitante para N, con valores entre 0.35 y 7.53 con un promedio de 2.76, lo que podría estar relacionado con la dominancia de cianobacterias, tal como se refleja en el análisis.



Las variables consideradas para el subíndice respectivo, NO₃, PO₄ y abundancia del fitoplancton (Ind/L), representan diferentes aspectos del proceso productivo primario que son relativamente fáciles de evaluar y monitorear. Se excluyó el nitrito (NO₂) y nitrógeno amoniacal (NH₃), debido a la falta de referencias para el consenso y la baja representatividad estadística.

En cuanto a la clorofila a, se excluyó del análisis debido a que durante el segundo período los valores estuvieron por debajo del límite de detección del método analítico, además por las ambigüedades que en ocasiones presenta este análisis, puesto que su concentración puede verse alterada por otros fenómenos como la etapa sucesional en que se encuentre la comunidad fitoplanctónica, el tipo de algas que predominen y la cantidad de clorofila degradada o inactiva, por lo que puede no ser un buen indicador del estado trófico (Pinilla y Duarte, 2006). En razón a lo anterior, se incluyó la determinación directa de la abundancia del fitoplancton (Ind/L) como un método más confiable y porque existe más información histórica disponible si se quieren hacer comparaciones multitemporales.

Los valores para el consenso y la asignación de valores en la escala para establecer la curva de calidad, se tomaron de la norma de calidad de aguas y descarga de efluentes al recurso agua de Ecuador, Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), normas para la prevención de la contaminación ambiental de Uruguay (Decreto 253/79 incluyendo las modificaciones 232/88, 698/89 y 195/91), el Decreto Supremo 004-2017-MINAM de Perú, el acuerdo CE-CCA001/89 por el cual se establecen los criterios ecológicos de calidad de aguas de México, el ICACC para la ciénaga Rincón (CRA, 2017), los datos del monitoreo del embalse del Guájaro (dic/2021 – ene/2022), el índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica (Calvo-Brenes, 2019), el índice de calidad de aguas (ICA) desarrollado por Mancera (2017) para los cuerpos de agua del área inundable del río Magdalena del departamento del Atlántico, y otras referencias y estudios en particular para el consenso en lo que tiene que ver con calidad de agua y abundancia del fitoplancton en aguas continentales como Margalef (1983), DeLeón y Chaar (2003), González et al., (2003), Leigh et al., (2010a, 2010b) y Peraza (2017).



A continuación, se registran las respectivas curvas de calidad y formulaciones para estas variables indicadoras de producción primaria en el embalse del Guájaro:

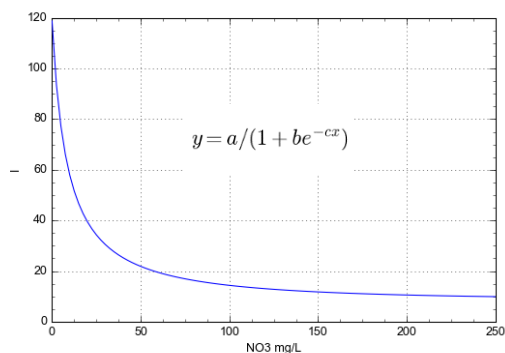


Figura 42. Curva de calidad para nitratos (NO4). a= 8,888052, b= -0,925197, c= 0,00889319 coeficiente de correlación (r)=0,91

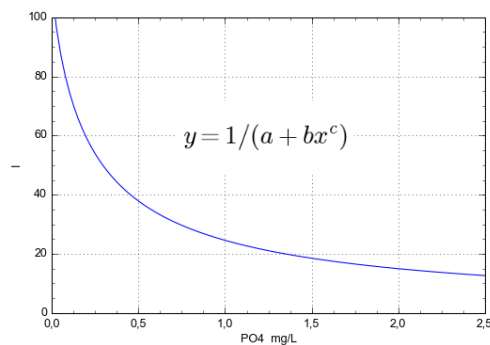


Figura 43. Curva de calidad para fosfatos (PO4). a= 0,00904846, b= 0,0316339, c= 0,864479 coeficiente de correlación (r)=0.97

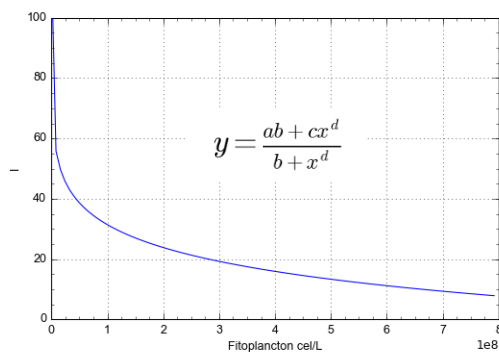


Figura 44. Curva de calidad para densidad de fitoplancton. a= 118,436383, b= 58,782826, c= -171,161222, d= 0,175271, coeficiente de correlación (r)=0.98

6.2.7. Agregación.

Las formas de agregación son diversas con aplicaciones diferentes al igual que su sensibilidad a las variaciones en los valores de los subíndices. Básicamente existen dos formas generalizadas, por sumatoria como la media aritmética y multiplicativa como la media geométrica, cuyas expresiones son:



$$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$$

Media aritmética

$$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{\frac{1}{n}}$$

Media geométrica

Algunas variaciones como la ponderación de los índices se han empleado, buscando la sensibilidad adecuada para cada caso bajo estudio. Por ejemplo, el promedio armónico no ponderado, es un método sensible a los cambios de las variables individuales, sin problemas de eclipsamiento ni ambigüedad (Dojlido et al., 1994). Esta forma de agregación permite a las variables más críticas tener mayor influencia sobre el valor final del índice, lo cual es preferible a que el índice se vea más influenciado por los subíndices a los que se les otorga mayor peso (Cude, 2001). Algunos autores como Richardson (1997), después de la revisión de varias fórmulas de agregación, se inclina a favor de la media armónica no ponderada para el desarrollo de un índice estuarino en Australia, lo cual se debe a la mayor sensibilidad hacia las variables con valores más bajos, lo cual asegura que los valores finales sean ponderados a favor de la protección ambiental (Fernández y Solano, 2005). Sin embargo, esta forma de agregación no puede ejecutarse cuando se tienen subíndices con valor de cero, igual que sucede con la media geométrica, y puede resultar demasiado sensible a valores cercanos a cero, dando como resultado un ICA extremadamente bajo, subestimando el resto de condiciones evaluadas.

Buscando una posición objetiva, libre de sesgos derivados de las formulaciones complejas, se escogió como método de agregación la media aritmética ponderada, puesto que es una de las formas más simples de agregación, originalmente propuesta por Horton (1965) y desarrollada por Brown et al. (1972), cuya expresión es:

$$ICA_{Acc} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i SubI_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$



6.2.8. Selección de la escala.

La escala del índice se estructuró, teniendo en cuenta que la calidad óptima o excepcional se acerca al valor de cien (100), mientras que la peor condición, para la preservación de flora y fauna se acerca a 1, teniendo en cuenta los siguientes grados de calidad y colores:

Tabla 52. Escala de calidad para determinar la condición ambiental del embalse del Guájaro.

Grado de calidad	Escala	
	Valor	Color
MUY BUENA: Indica que las condiciones son excepcionalmente favorables para el ecosistema y la sobrevivencia de los organismos que lo habitan.	100	Blue
	80	
BUENA: indica que los niveles de contaminación son muy bajos y se cumple con las condiciones para la conservación de la fauna y la flora.	79	Green
	60	
REGULAR: Indica que las condiciones son parcialmente favorables para la sobrevivencia de los organismos. Puede que algunas variables excedan los límites de calidad o se encuentren en el límite de efectos crónicos adversos.	59	Yellow
	40	
MALA: indica que la contaminación es evidente, una parte significativa de las variables muestran valores por encima del límite de calidad o están cerca de concentraciones con efectos agudos para la biota acuática.	39	Orange
	20	
MUY MALA: Indica que existen altos niveles de contaminación, con condiciones que limitan la sobrevivencia de los organismos acuáticos, afectando significativamente su abundancia y diversidad. Muchas variables o variables críticas estarían sobrepasando niveles adecuados para la preservación de la fauna y flora.	19	Red
	10	
	0	

6.2.9. Validación.

Para la validación del índice, se puso a prueba con los datos de la caracterización realizada para este estudio, haciendo comparaciones entre los eventos de aguas altas y aguas bajas, consideradas como “normales” teniendo en cuenta que en dicho período no se registraron eventos relacionados con mala condición del agua, en particular mortalidad masiva de peces o de otros organismos asociados. Estos resultados fueron comparados con el resultado del índice calculado con la caracterización realizada el 21 de marzo del 2019, ordenada por la C.R.A. debido a reportes de mala calidad del agua, en particular por presencia de mortalidad de peces, además de reses muertas. En el reporte respectivo, se mencionan altas concentraciones de nitrógeno amoniacal, elevadas concentraciones de fósforo que sugieren condiciones de eutrofia, aumento del pH y alta densidad del fitoplancton con dominancia de cianobacterias y presencia de especies como *Dollicospermum circinale* con



potencial tóxico. Se comenta en el informe que estas condiciones pudieron ser favorecidas por la acumulación de materia orgánica cerca de la orilla, debido a la acción del viento y la hidrodinámica del lugar de los eventos.

En términos generales, se puede observar que el embalse de El Guájaro, durante el monitoreo realizado entre 2021 y 2022, presentó condiciones generales, entre buena y muy buena calidad, principalmente durante el monitoreo de diciembre cuando se registraron altos niveles del embalse, lo que viene dado posiblemente por una mayor recirculación, entrada de agua nueva desde el canal del dique, a través de escorrentías, lluvia directa y por lo tanto una mayor dilución. Hacia el mes de enero, entrada la época seca, se observa cierto descenso en los valores del ICA, pasando de un promedio en el puntaje de 82, a 67 puntos en el indicador, con la aparición de algunos valores indicadores de condiciones regulares, en las estaciones P7 y P9 que corresponden con la parte norte del embalse.

Esta caída en los valores medios del índice, fueron particularmente propiciados por detrimento en las condiciones microbiológicas y de contenido de materia orgánica, en parte por vertidos y en parte por producción autóctona, siendo conspicuos los valores indicadores de mala calidad, en particular en la zona media y norte del embalse, donde existe influencia de poblaciones como Aguada de Pablo, La Peña y Rotinet.

Tabla 53. Resultado del ICA Guájaro para el período dic/2021 – ene/2022.

Fecha de muestreo	Punto de muestreo	Subíndices					ICA Guájaro
		Metales	Cond del Medio	MO y Microbiol	Cont Res	Prod	
12/12/2021	P1	96	92	71	100	92	87
	P2	87	88	66	100	92	83
	P3	96	89	89	100	94	92
	P4	96	85	81	100	93	88
	P5	89	87	29	100	85	71
	P6	89	79	74	100	92	83
	P7	96	64	65	100	82	75



Fecha de muestreo	Punto de muestreo	Subíndices					ICA Guájaro
		Metales	Cond del Medio	MO y Microbiol	Cont Res	Prod	
22/1/2022	P8	89	82	56	100	84	77
	P9	96	71	78	100	92	83
	P1	96	90	18	100	88	70
	P2	96	87	30	100	86	72
	P3	96	84	78	100	89	86
	P4	96	69	20	100	85	63
	P5	96	88	15	100	87	68
	P6	96	92	19	100	80	69
	P7	89	49	20	100	80	56
	P8	95	47	33	100	80	60
	P9	96	68	8	100	80	58

En la **Tabla 54**, se registran algunos resultados de las variables y análisis realizados el 21 de marzo de 2019 con ocasión del evento de mala calidad del agua. Se analizaron 9 variables fisicoquímicas: pH, conductividad, oxígeno disuelto, turbiedad, fósforo total, fósforo reactivo (PO₄), nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal además de fitoplancton como variable microbiológica de interés por la posible presencia y floración de componentes tóxicos (cianobacterias). Adicionalmente se analizó el contenido de plaguicidas organoclorados y organofosforados, aunque no aparecen en esta tabla porque los valores se encontraron por debajo del límite de detección.

Tabla 54. Resultados de los análisis de laboratorio en tres puntos del embalse del Guájaro, durante un evento de mala calidad del agua por mortalidad de animales domésticos y peces, registrado en marzo de 2019.

Variable	P1	P2	P3
	10°30'27.8"	10°30'26.5"	10°30'29.8"
	75°00'35.0"	75°00'37.4"	75°00'34.5"
pH	9,26	10,45	10,42
cond (uS/cm)	1739	1419	1402
OD (mg/L)	0,6	16,89	19,96
PT (mg/L)	15,15	0,22	0,57
NO ₃ (mg/L)	1,35	0,81	0,15
NO ₂ (mg/L)	0,096	0,011	0,012



Variable	P1	P2	P3
	10°30'27.8''	10°30'26.5''	10°30'29.8''
	75°00'35.0''	75°00'37.4''	75°00'34.5''
NH3 (mg/L)	3,46	0,81	0,67
Turbiedad (NTU)	3084	270,5	161,5
PO4 (mg/L)	44,69	0,49	0,62
Fitoplancton (ind/L)	389285000	40000000	15900000

Teniendo en cuenta que no todas las variables del índice (ICA Guájaro) fueron determinadas para el evento de marzo de 2019, se calcularon solo algunos de los subíndices, y al agruparlos los pesos (wi) de los faltantes se distribuyeron equitativamente en los subíndices que pudieron ser calculados. De esta manera, solo se obtuvo resultado para el subíndice condiciones del medio (pH y oxígeno disuelto), y el subíndice productividad (NO₃, PO₄ y Fitoplancton). Como resultado, en la **Tabla 55**, se observa que los subíndices y el índice en general (ICA Guájaro) responden a lo esperado, presentando condiciones del medio malas y muy malas de acuerdo con la escala, en particular por las concentraciones extremas del oxígeno disuelto estando cerca de la anoxia y en sobresaturación. También se presentan valores de pH altos, superiores a 9 que es un límite referenciado en muchas normas, incluyendo los objetivos de calidad establecidos por la C.R.A (Resolución 000449/2021).

El subíndice de productividad presentó en la escala valores de mala calidad a regular calidad, principalmente por el alto contenido de fosforo soluble (PO₄), tirando del balance en una relación N/P que deja como limitante al nitrógeno, lo cual es característico de aguas dominadas por grupos como las cianobacterias en este caso con componentes potencialmente tóxicos como *Dolichospermum circinale*, que representó más del 70% de la abundancia de la comunidad fitoplanctónica, de la que se determinaron altas abundancias, que coinciden con sistemas eutrofizados e hipereutrofizados.

Tabla 55. Resultados del ICA Guájaro para el evento de marzo de 2019.

Punto de muestreo	Subl cond del medio	Subl Productividad	ICA Guájaro
P1	26,37	30,71	28,32
P2	11,67	54,01	30,73





Punto de muestreo	Subl cond del medio	Subl Productividad	ICA Guájaro
P3	10,42	59,88	32,68



7. CONCLUSIONES

Aunque el oxígeno disuelto en todos los puntos de muestreo, en ambos monitoreos, cumple con el límite de calidad del Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, es probable que la productividad fitoplanctónica obtenida sea la causante de que en P7 y P9, en época seca, se presenten concentraciones que podrían estar causando sobresaturación.

Si bien no se apreció contaminación por DBO₅, el valor más alto registrado en P9 sugiere que la descomposición de material vegetal es la causante de los aumentos del consumo de O₂ en el agua y por ende de la DBO₅.

Hay una fuerte relación entre la transparencia, los SST y la clorofila-a, principalmente en época de lluvias, donde se les observa el mismo comportamiento gráfico. Durante las lluvias, es habitual que haya una resuspensión de sedimentos desde el fondo y entren otros por escorrentías, además se crean condiciones aptas para el desarrollo de productores primarios, que ayudan a disminuir la entrada de luz en la columna de agua. No obstante, los registros de SST señalan aguas de buena calidad para esta variable.

Los nutrientes fosforados manifiestan contaminación en época seca (excepto en P4 y P9), causando eutrofización del sistema.

En los puntos del embalse más al norte (P4 a P9), el suelo probablemente está compuesto por formaciones rocosas de yeso y superficies sulfatadas que son llevados hasta la columna de agua por escorrentías, aumentando las concentraciones de sulfuros, o se puedan estar generando por el lavado de sales añadidas en actividades agrícolas.



Los nitritos (NO_2), podrían estar indicando contaminación, principalmente en época de lluvias (todo el embalse) y en P9 en época seca ocasionada principalmente por el vertimiento de aguas residuales domésticas.

Los metales pesados no son elementos de preocupación en la calidad del agua del embalse debido a que la mayoría de los analizados presentan concentraciones que no son detectables con los métodos empleados, y de los que si se obtuvieron resultados se encuentran por debajo de cualquier límite de cuantificación revisado.

La disminución de la columna de agua en época seca es la causante que, en casi todos los puntos monitoreados, las CT y CTE se presenten altas por la concentración de las descargas en el embalse y el aumento de la actividad de los microorganismos.

La presencia de *Pseudomonas* en P6 y P7 en época seca pone en evidencia contaminación por descarga de aguas residuales.

La comunidad perifítica del Embalse del Guájaro estuvo conformada por 26 morfoespecies, en su mayoría pertenecientes a la División Bacillariophyta. Demostrando mayor riqueza de especies en los Puntos 5 y 1 (16 y 14 morfoespecies), mientras que el Punto 9 presentó una abundancia muy alta (18989 Ind/cm^2), comparada con los puntos restantes. Se evidenció que en todos los puntos de muestreo predominaron especies de la División Bacillariophyta (*Nitzschia* sp3, *Navicula* sp1 y *Gomphonema* sp1), cuya dominancia puede estar asociada al estado eutrófico del sistema. El análisis comparativo del año en curso (2022) contra el año 2021 demostró que no hubo muchas diferencias en la composición de la comunidad. Se observó una diversidad de baja (P9, 1,164 nats) a media (P3, 2,11 nats), cuya interpretación de Segnini (2003) indica la presencia de aguas ligeramente contaminadas.

Por su parte la comunidad fitoplanctónica estuvo conformada por 35 morfoespecies, repartidas homogéneamente entre las Divisiones Cyanobacteria (25,7%), Bacillariophyta y Chlorophyta (22,8%



cada una) y Euglenozoa (17,2%), mientras que las divisiones restantes Ochrophyta y Charophyta solo reportaron el 5,7% cada una. Por su parte la mayor densidad total la aportaron los representantes de la División Bacillariophyta, con el 94,4% de la abundancia total. De igual manera se observaron variaciones espaciales en riqueza de especies y abundancias, para la primera, los Puntos 1, 2 y 3 presentaron riquezas altas (14, 18 y 12 morfoespecies, respectivamente), mientras que en los puntos 4 a 9 la riqueza fluctuó entre 2 y 10 morfoespecies (P7 y P9, respectivamente); mientras que la abundancia de los puntos 1 al 5 presentó densidades bajas (entre 14330 Ind/L en el Punto 4 y 30600 Ind/L en el Punto 5), la abundancia de los puntos 6 al 9 fue muy alta (entre 155969 Ind/L en el Punto 9 y 274020 Ind/L en el Punto 8). Se evidenció además el predominio de las morfoespecies pertenecientes a la División Cyanobacteria entre los puntos 4 y 9, siendo *Microcystis* sp la predominante en los puntos 6 al 9 y *Aphanocapsa* sp1 en los puntos 4 y 5. Por su parte, en los Puntos 1 al 3 predominaron especies de la División Bacillariophyta, *Aulacoseira* sp en los Puntos 1 y 2 y *Surirella* sp1 en el Punto 3. La revisión histórica reveló pequeñas fluctuaciones espaciales, permaneciendo las características generales, la mayor abundancia de morfoespecies de la División Cyanobacteria en inmediaciones de los Puntos 5 al 9, lo que llama la atención, ya que en dicha zona pueden estar ocurriendo condiciones que fomenten el desarrollo especies del género *Microcystis*, sobre los cuales se recomienda mantener seguimiento y establecer medidas de manejo y control para evitar afloramientos de cepas que contengan cianotoxinas.

El zooplancton en el embalse el Guajaro se encuentra mayormente representado por los phylum Athropoda y Rotifera, los cuales son representantes comunes en sistemas dulceacuícolas el primero por sus diferentes formas que incluyen cladocera, ostracoda y copepoda siendo estos últimos los más abundantes y diversos en este tipo de sistema, por su parte Rotifera también es de gran aporte tanto a la riqueza como a la diversidad en estos sistemas tal como sucedió en este monitoreo.

Larva nauplio de Cyclopoida fue la morfoespecie más relevante en este monitoreo a lo largo de las dos campañas se reportó en todos los puntos estudiados en la mayoría obtuvo la mayor de las densidades. Esto es congruente con este tipo de sistemas ya que estas formas inmaduras en altas proporciones son comunes en estos sistemas pues esta es una forma de adaptación a las condiciones fluctuantes de estos sistemas. *Filinia* sp, *Brachionus falcatus*, *Ascomorpha* sp y *Keratella*



sp están entre las morfoespecies de rotíferos relevantes en el embalse el Guajaro, este grupo se caracteriza por una gran diversificación y son importantísimos en la transferencia de materia y energía a diversos organismos.

Para la campaña 1 se reportó una mayor Riqueza y una mayor densidad con respecto a la campaña 2 sin embargo los índices de diversidad arrojaron que todos los puntos de monitoreo presentan baja diversidad de riqueza específica. Además, en diversos puntos se evidenció que la equidad y la dominancia eran congruentes sugiriendo condiciones óptimas para el establecimiento de las diferentes poblaciones del Zooplancton.

La comunidad de macrófitas en el Embalse del Guájaro estuvo conformada por siete (7) especies, siendo *Eichhornia crassipes* la que presentó mayor área de cobertura promedio, con un total del 29,5% del área evaluada, seguida por *Paspalum* sp2 (13,4%). Se evidenció que *E. crassipes* presentó la mayor cobertura en los Puntos 2 (72,8%), 5 (92%) y 9 (49,8%); *Paspalum* sp2 lo fue en el Punto 1 (67,6%) y 6 (52,8) y *Lemna minor* lo fue en el Punto3 (38,8%). *Eichhornia crassipes* presenta alta capacidad invasiva, indicativo de la necesidad de establecer medidas de evaluación y control sobre la macrófitas en la ciénaga.

La comunidad de los macroinvertebrados en el embalse del Guájaro estuvo representada por los phyla Mollusca y Arthropoda, siendo el primero el dominante, estos phylum se encuentran normalmente en este tipo de sistemas ya que poseen una gran variación en su riqueza y adaptaciones que les permiten establecerse en estos.

La morfoespecie más abundante fue Hidrobiidae morfo1, aunque no se presentó en todos los puntos de monitoreo, en comparación con *Melanoides* sp la cual si se reportó en la mayoría de ellos esta morfoespecie se considera con una amplia distribución y capacidad de ocupar los diferentes hábitats que se puedan encontrar en los sistemas como el embalse del Guájaro.



En cuanto a los índices de diversidad en la mayoría de los puntos no pudieron ser calculados ya que el número de morfoespecies era bajo, lo que puede sugerir que existen condiciones que permiten que algunas morfoespecies dominen sobre otras. para el punto 1 en la campaña dos se contó con el número de morfoespecies necesario, pero arrojó valores bajos de diversidad específica.

Para la distribución temporal tenemos que en la campaña 1 se presentó la mayor densidad, pero no la mayor riqueza sugiriendo en este momento las condiciones estaban a favor de determinadas poblaciones que incrementaron sus densidades en contraste con lo sucedido en la campaña dos que las densidades fueron bajas, pero con mayor riqueza lo que podría indicar que las condiciones permitieron que diferentes poblaciones pudieran competir por los recursos y crecer.

El embalse del Guájaro además de ser la más grande despensa de agua del departamento del Atlántico, se ha caracterizado por ser también la principal fuente de ingreso de muchas personas de los diferentes municipios que lo rodean, que dependen completamente de la pesca. Pero en los últimos años este ha tenido una gran disminución del recurso pesquero, se ha documentado la desaparición de muchas especies de interés comercial (Bocachico, cuatro ojos, bagre blanco, bagre rayao, entre otras) y otras que, aunque nunca han hecho parte de tal interés, si son ecológicamente importantes (los coroncoros, la raya y algunas pequeñas sardinas).

La disminución en la diversidad de peces puede ser evidenciada en los resultados de este trabajo, ya que después de grandes esfuerzos de pesca en nueve (9) estaciones de monitoreo, se reportan ocho (8) especies icticas, lo cual representa el 7,14% de la reportada para la cuenca baja del río Magdalena. cabe resaltar, además, que dos (2) de estas especies fueron recientemente sembradas en dicho sistema, como lo son *Oreochromis niloticus* y *Mugil liza*, esto como estrategia por parte de los entes gubernamentales para solventar la falta de recurso pesquero.

Existe clara diferencia en la riqueza y abundancia de peces en los dos monitoreos llevados a cabos, en diferentes condiciones hidrológicas. El primer monitoreo presentó mayor riqueza y abundancia, pasando de ocho (8) taxones a solo tres (3) en el segundo monitoreo. Aunque la diferencia en la



composición y estructura de la ictiofauna, en periodos de bajas y altas lluvias resulta normal, es de anotar la diferencia en la distribución de las especies en las estaciones de monitoreo, ya que en el segundo solo se capturaron individuos en los puntos P6, P7, P8 Y P9.



SERAMBIENTE S.A.S.
Barranquilla, Colombia
mayo de 2022

INFORME VÁLIDO ÚNICAMENTE PARA LA(S) MUESTRA(S) ANALIZADA(S). LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DEL PRESENTE INFORME DEBE HACERSE CON AUTORIZACIÓN EXPRESA DE SERAMBIENTE S.A.S. CUALQUIER TIPO DE OBSERVACIÓN REQUERIDA POR EL CLIENTE Y RELACIONADA CON LOS RESULTADOS EMITIDOS, SÓLO SERÁ ACEPTADA DENTRO DE LOS 4 DÍAS SIGUIENTES AL ENVÍO PARCIAL DE ESTE INFORME. SI NO SE RECIBE OBSERVACIÓN EN EL TIEMPO ESTABLECIDO, SE DA POR ACEPTADO EL INFORME Y SE PROCEDERÁ A SU IMPRESIÓN. FINALIZADO EL MONITOREO, LAS MUESTRAS SE CONSERVARÁN 10 DÍAS Y CUMPLIDO ESTE TÉRMINO EL LABORATORIO PROCEDERÁ A LA DISPOSICIÓN FINAL DE LAS MUESTRAS. EL CLIENTE SE HACE RESPONSABLE POR LA CONFIDENCIALIDAD DE LOS RESULTADOS CUANDO ESTOS SEAN ENVIADOS POR CORREO ELECTRÓNICO O FAX.



8. REFERENCIAS

- Alonso, A. 2005. Valoración de la degradación ambiental y efectos ecotoxicológicos sobre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en la cabecera del río Henares. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares (Madrid), España.
- Álvarez, C. 2016. Determinación analítica de detergentes en las aguas de los pantanos de Villa. Tesis para optar el Título de Licenciada en Química. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú. 97 p.
- Amado-Alvarez, J, Pérez-Cutillas, P, Alatorre-Cejudo, L. C, Ramírez-Valle, O, Segovia Ortega, E. F. y Alarcón-Cabañero, J. J. 2019. Análisis multiespectral para la estimación de la turbidez como indicador de la calidad del agua en embalses del estado de Chihuahua, México. Revista Geográfica de América Central, (62), 33-61.
- American Public Health Association (APHA). 2017. Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater. 23th Edition. Amer. Pub. Heal. Asoc, Washington. EE.
- Arcgis. 2021. Recuperado en: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Arredondo, J. L. 1993. Fertilización y Fertilizantes: su uso y manejo en la Acuicultura. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. México, D.F.
- Authman M, Zaki M, Khallaf E, Abbas H. Use of fish as bioindicator of the effects of heavy metals pollution. J. Aquac. Res. Development. 2015; 6, 1-13.
- Avila, A. 2019. Análisis y clasificación de firmas espectrales utilizando técnicas de aprendizaje automático. Instituto Nacional de Astrofísica, óptica y electrónica. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1677/1/AvilaGAP.pdf>
- Barahona-Castillo, Y.M, Luna-Fontalvo, J.A. y Romero-Borja, I.M. 2017. Calidad bacteriológica del agua de los ríos Manaure y Casacará, Departamento del Cesar, Colombia.
- Barrera, E. G. y Wong, Ch.I. 2005. Contaminación por microorganismos en zonas costeras, p. 475-486. En: Botello, A. V.; Rendón-von Osten, J.; Gold-Bouchot, G. y Agraz-Hernández, C. (Eds.). Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición.



Univ. Autonomabarreraxxxx de Campeche, Univ. Nal. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.

- Berdugo, M.A.G. y Reales, L.G.J. 2016. Análisis multiespectral de imágenes satelitales para evaluar variaciones espacio - temporales en la calidad del agua del embalse Del Guájaró, Atlántico. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Ambiental. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad de la costa (CUC). Barranquilla, Colombia. 72 p.
- Bohl M. (1997). Gas bubble disease of fish. Tierarzliche Praxis Vol. 25, 284-288 pp.
- Brivio P.A, Giardino, C. & Zilioli, E. 2001. Validation of satellite data for quality assurance in lake monitoring applications. Sci Total Environ, 268, 3–13. Recuperado de [http://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00693-8](http://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00693-8)
- Broecker, W.S. 1974. Chemical oceanography. Hartcourt Brace J. Inc. 214 pp.
- Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A. & O'Connor, M.F. 1972. Water Quality Index- Crashing, the Psychological Barrier, Proc. 6th Annual Conference, Advances in Water Pollution Research. p 787-794.
- Cabrera Molina, E., Hernández, L., Gómez, H. y Cañizares, M. (2003). Determinación de nitratos y nitritos en agua: Comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar. Revista de la Sociedad Química de México, 47(1), 88-92. Recuperado en 11 de mayo de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932003000100014&lng=es&tlng=es.
- Calera, B. A. 2003. Principios Físicos En la Percepción Remota. En I. d. Albacete, Teledetección y Desarrollo Rural. Albacete, España: Universidad Castilla La Mancha.
- Chuvieco, E. 2010. Teledetección Ambiental La observación de la Tierra desde el Espacio. Barcelona: Ariel.
- Cirujano, S. 1995. Flora y vegetación de las lagunas y humedales de la provincia de Cuenca. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. CSIC. Real Jardín Botánico de Madrid. 224 pp.
- CONAGUA- SEMARNAT. 2014. Estadísticas del Agua en México. Edición 2013. México.
- CONAMA, 2004. "Guía para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas". Departamento de Control de la Contaminación de la Comisión Nacional del Medio Ambiente. 4-18 p.



- Corporación Autónoma Regional del Atlántico – CRA. 2017. Monitoreo fisicoquímico, microbiológico e hidrobiológico sobre la calidad y estado de los cuerpos de agua, las fuentes hídricas del departamento Del Atlántico y la caracterización de los humedales Sabanagrande, Santo Tomas y Palmar de Varela (año 2016) en cumplimiento de lo establecido en el Plan de Acción Institucional 2016 – 2019. Informe final. Barranquilla.
- Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CRA. 2015. Resolución 279 de mayo 19 de 2015. Por medio de la cual se establecen unas directrices generales para la conservación de la ciénaga El Rincón o el Lago del Cisne, departamento del Atlántico. FIODMO. (s.f.). Obtenido de <https://www1.paho.org/per/images/stories/PyP/PER37/15.pdf>
- Cude, C.G. 2001. Oregon wáter Quality Index (OWQI): a tool for evualating wáter quality management efectiveness. Journal of the American Water Resources Association. 37(1):125-137
- De León, L., & Chalar, G. 2003. Abundancia y diversidad del fitoplancton en el Embalse de Salto Grande (Argentina-Uruguay). Ciclo estacional y distribución espacial. Limnetica, 22(1-2), 103-113.
- De Vicente, A, Codina, J.C, Borrego, J. y Romero, P. 1991. Relationship between Pseudomonas aeruginosa and bacteria indicators in polluted natural waters. Wat. Sc. Tech. 24: 121-124.
- Díaz-De Alba, M. 2007. Determinación de subtrazas de cobre en aguas, previa preconcentración con discos de SDB modificados. Memoria presentada para optar por el titulo de Máster en Gestión Integral del Agua. Universidad de Cádiz. Cadiz-España. 52 p.
- Dojlido, J., Raniszewski, J. & Woyciechowska, J. 1994. Water quality index applied to rivers in the Vistula river basin in Poland. Environmental Monitoring and Assessment, 33 (1), 33-42
- EEA. 2000. Nutrients in European ecosystems. Environmental Assessment Report No 4. European Environment Agency, Copenhagen.
- EEA. 2005. Source apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment. Environmental Assessment Report No 7. European Environment Agency, Copenhagen.
- Elston. 1983. Histopathology of oxygen intoxication in the juvenile red abalone,
- Environment. 2001. Priority substances assessment report: ammonia in the aquatic environment. Minister of Public Works and Government Services, Ottawa.



- EPA. 1999. Update of ambient water quality criteria for ammonia. US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- EPA. 2006. National recommended water quality criteria. US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Espinoza, C. (2005). Calidad del agua y contaminación de agua subterránea. Chile: Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento.
- Fernández, P.N.J. Y Solano, O.F. 2005. Indices de calidad y de contaminación del agua. Capítulo IV: Análisis comparativo de los índices de calidad (ICA's) y de los índices de contaminación (ICO's) del agua. Universidad de Pamplona. P 118-142.
- Feyisa, G.L, Meilby, H, Fensholt, R. & Proud, S.R. 2014. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 140, 23–35. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Flores, V.F.J.; Agraz, H.C. y Benitez, P.D. 2007. Ecosistemas acuáticos costeros: Importancia, retos y prioridades para su conservación. En: Verdugo, F. J. F, Hernández, C. A, & Pardo, D. B. Ecosistemas Acuáticos costeros: Importancia, reto y prioridades para su conservación. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. p147-166.
- Garcés-Ordóñez, O, Vivas-Aguas, L.J, Martínez, M, Córdoba, T, Contreras, A, Obando, P, Moreno, Y, Muñoz, J, Nieto, Y, Ríos, M, Sánchez, J. y Sánchez, D. 2016. Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras del Caribe y Pacífico colombianos. Serie de Publicaciones Periódicas del Invermar No. 4 (2016). Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia (REDCAM). Informe técnico 2015. INVEMAR, MADS y CAR costeras. Santa Marta. 377 p.
- García-Alzate, C. A., Gutiérrez, L. C., De la Parra, A., & Alvarado, M. 2016. Embalse de El Guájaro: Diagnóstico ambiental y estrategias de rehabilitación. Sur del Atlántico, 148-181.
- Gómez Díaz, J.L. y Dalence Martinic, J.S. 2014. Determinación del parámetro sólidos suspendidos totales (SST) mediante imágenes de sensores ópticos en un tramo de la cuenca media del río Bogotá (Colombia). UD y la Geomática, (9).



- González, E. J., Ortaz, M., Peñaherrera, C., & Matos, M. L. 2004. Fitoplancton de un embalse tropical hipereutrófico (Pao-Cachinche, Venezuela): abundancia, biomasa y producción primaria. *Interciencia*, 29(10), 548-555.
- HACH. (s.f.). Obtenido de file:///C:/Users/57301/Desktop/14795464_DOC043.61.30196. web. pdf
- Hakanson, L, Mikrenska, M, Petrov, K. & Foster I. 2005. Suspend particulate matter (SPM) in rivers: empirical data and models. *Ecological Modelling*, 183, 251-267. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.07.030>
- Haliotis rufescens. En: Fidler, L. E., & Miller, S. B. 1994. British Columbia water quality guidelines for dissolved gas supersaturation. Prepared for BC Ministry of Environment, Fisheries and Oceans Canada and Environment Canada.
- Hernandez, J, y Hernández, M. 2013. Percepción Remota Como Herramienta Para El Monitoreo De La Calidad Del Agua. Facultad de Ingeniería, Centro Interaamericano de Recursos del Agua.
- Hernández, O, A. I., Marin, M., Henriquez, L., & Garay, M. 2016. Variación espacial y temporal de la diversidad y abundancia del fitoplancton del lago de Yojoa en un año hidrológico 2014-2015. *Revista Ciencia y Tecnología*, 40-77.
- Horton, R. K. 1965. An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 37(3), 300-306.
- <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/cesar/becerril-53368/>. (2021). Obtenido de <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/cesar/becerril-53368/>: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/cesar/becerril-53368/>
- INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras). 2001. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2000. Santa Marta, Colombia. P 70-83.
- INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras). 2003. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos (aguas, sedimentos y organismos). Programa Calidad Ambiental Marina – CAM. Santa Marta, Colombia. 148 p.
- INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras). 2017. Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras en el Caribe y Pacífico colombianos. Garcés, O. y L.



Espinosa (Eds.). Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM: INVEMAR, MADS y CAR costeras. Informe técnico 2016. Serie de Publicaciones Periódicas No. 4 (2017) del INVEMAR, Santa Marta. 260 p.

- INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras). 2021. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2020. Serie de Publicaciones Periódicas No. 3. Santa Marta. 268 p.
- Jiménez, D.L. 2006. Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre una zona estuarina, aledaña al terminal de ecopetrol en Tumaco. (tesis de pregrado). Ingeniería Ambiental Sanitaria. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.
- Kemmer, F. y McCallion, J. 1999. Manual de Agua (su naturaleza, tratamiento y aplicaciones), Nalco Chemical Company, Editorial McGraw-Hill, 55-70 pp. México.
- Kiefer, I, Odermatt, D, Anneville, O, Wüest, A. & Bouffard, D. 2015. Application of remote sensing for the optimization of in-situ sampling for monitoring of phytoplankton abundance in a large lake. Science of the Total Environment, 527, 493-506.
- Kim, Y. H, Son, S, Kim, H. C, Kim, B, Park, Y. G, Nam, J. & Ryu, J. 2020. Application of satellite remote sensing in monitoring dissolved oxygen variabilities: A case study for coastal waters in Korea. Environment international, 134, 105301.
- Krumova, K., M. Nikolovska, and V. Groudeva. 2008. Isolation and identification of arsenic-transforming bacteria from arsenic contaminated sites in Bulgaria. Biotechnol. Biotechnol. Eq. 22: 721-728.
- Kumari B, Kumar V, Sinha A, Ahsan J, Ghosh A, Wang H, DeBoeck G. Toxicology of arsenic in fish and aquatic system. Environ. Chem. Lett. 2016; 15, 43-64
- Lampert, W. Y U. Sommer. 1997. Limnoecology. Oxford University Press
- Lechuga M.M. 2005. Biodegradación y toxicidad de tensioactivos comerciales. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Barcelona. Barcelona, España, 461 pp.
- Leigh, C., Burford, M. A., Sheldon, F., & Bunn, S. E. (2010b). Dynamic stability in dry season food webs within tropical floodplain rivers. Marine and Freshwater Research, 61(3), 357-368.
- León, L. 1991. Índice de Calidad del Agua ICA. Inf# Sh-9101/01. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. 36 p.



- López-Ortega, M, Pulido, G, Serrano, A, Gaytán, J, Monks, W. y López, M. 2012. Evaluación de las variables físicoquímicas del agua de la Laguna de Tampamachoco, Veracruz, México. Revista Científica UDO Agrícola 12 (3): 713-719.
- Mancera-Quevedo, P. 2017. Obtención de un índice de calidad de agua (ICA) para las ciénagas que forman parte de la zona inundable del río Magdalena en el departamento del Atlántico-Colombia, a través de la aplicación del Método Delphi (Master's thesis, Universidad Internacional de Andalucía).
- Margalef, R. 1983. Limnología. Omega
- Marín, G.L. 2007. Aproximación ecotoxicológica a la contaminación por metales pesados en la laguna costera del Mar Menor. Memoria presentada para optar al grado de doctor en biología. Departamento de ecología e hidrología. Facultad de Biología. Universidad de Murcia. 212 p.
- Martinez C, Nagae M, Zaia C, Zaia D. Acute morphological and physiological effects of lead in the neotropical fish *Prochilodus lineatus*. Braz. J. Biol. 2004; 64, 797-807.
- Maynard, C. (2008). Evaluation of total dissolved gas criteria (TDG) biological effects research: A literature review. Washington State Department of Ecology.
- Millán, A. M. 2005. Cambios históricos en la composición y distribución de la malacofauna bentónica de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Caribe Colombiano). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/1379A>
- Aiman M, E, & Mohsen M, Y. (2014). Statistical Estimation Of Rosetta Branch Water Quality Using Multi-Spectral Data. Water Science 28, 18-30. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110492914000216>
- Organización mundial de la salud - OMS. 2017. Esquistosomiasis. Centro de prensa. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs115/es/>
- Ortiz, P.L.J. y Morgado, G.W.B. 2009. Evaluación de la calidad ambiental de la ciénaga de Balboa, Municipio de Puerto Colombia, Caribe Colombiano. Trabajo de grado para optar al título de microbiólogo. Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad Libre. Barranquilla, Colombia. 130 p.
- Paerl, H. 1988. Growth and reproductive strategies of freshwater blue-green algae (cyanobacteria). En: Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton. Sandgren C. (ed.). Cambridge University Press



- Pandey G, Madhury S. Heavy metals causing toxicity in animals and fishes. Res. J. An. Vet. Fish. Sci. 2014; 2, 17-23.
- Parra, J.P y Espinosa, L.F. 2008. Distribución de metales pesados (Pb1, Cd y Zn), en perfiles de sedimento asociados a Rizophora mangle, en el río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Bol. Invest. Mar. Cost. 37(1) 95:110.
- Perdomo Vanegas, A. 2015. Predicción de parámetros físico químicos de calidad del agua mediante el uso de sensores remotos: caso estudio Embalse del Neusa.
- Qgis. 2021. Recuperado en: <https://qgis.org/es/site/about/index.html>
- Quintero, L, Agudelo, E, Quintana, Y, Cardona, S. y Osorio, A. 2010. Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. Gestion y Ambiente 13 (3), 51-64.
- Ramírez, A, Restrepo, R. y Cardeñoza, A.M. 1999. Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. Formulaciones. Ciencia Tecnología y Futuro 1(5): 89-99.
- Ramirez, A. R., Restrepo, R. y & Viña, G. 1997. Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. Formulaciones y aplicación. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(3), 135-153.
- Ramírez, R., & Cardeñosa, M. (1999). Índices de contaminación para caracterización de aguas continentales y vertimientos. Formulaciones. CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro, 1(5), 89-99.
- Raraz, E. 2015. Determinación químico toxicológica de plomo y cadmio en agua para consumo humano proveniente de los reservorios de la zona de San Juan Pampa – distrito de Yanacancha – Pasco. Tesis para optar al título profesional de Químico Farmacéutico. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. 83.p.
- Richardson, A. 1997. Development of an Estuarine Water Quality Index (Ewqi) for New South Wales. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of bachelor of science (Honours). University of Sidney. 1448 p.
- Ríos-Tobón, S, Agudelo-Cadavid, R.M. y Gutiérrez-Builes, L.A. 2017. Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. Revista Facultad Nacional Salud Pública.



- Rodríguez-Zamora, J. 2009. Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre del 2008. Revista Pensamiento Actual, Universidad de Costa Rica Vol. 9, No. 12-13.
- Roldán, G, Y Ramírez, J. 2008. Fundamentos de limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Romero J.A. 1996. Acuiquímica. Presencia. Santafé de Bogotá. 56 pp.
- Salas, J.H. y Martino, P. (2001). Metodologías simplificadas para la evaluación de la eutroficación en lagos cálidos tropicales. Centro Pnamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Organización Panamericana de la Salud (OPS), División Salud y Ambiente, Organización Mundial de la Salud (OMS). OPS/CEPIS/PUB/01. 63 p.
- Sawyer, C.N. & McCarty, P.L. 1978. Chemistry for Environmental Engineering. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Scheffer, M., S. Rinaldi, A. Gragnani, L. Mur Y E. Vannes. 1997. On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow turbid lakes. Ecology, 78: 272-282.
- Sebastiá-Frasquet, M. T, Aguilar-Maldonado, J. A, Santamaría-Del-Ángel, E, & Estornell, J. 2019. Sentinel 2 analysis of turbidity patterns in a coastal lagoon. Remote Sensing, 11(24), 2926.
- Shafaqat A, Mujahid F, Saima B, Rehan A. Effect of different heavy metal pollution on fish. Res. J. Chem. Envi. Sci. 2014; 2, 74-79
- Sierra-Ramírez, C.A. 2011. Calidad del agua: evaluación y diagnóstico. 1ª Ed. Universidad de Medellín. Colombia. p 457.
- Sri-Aroon, P, Butraporn, P, Limsomboon, J, Kerdpuech, Y, Kaewpoolsri, M. & Kiatsiri, S. 2005. Freshwater mollusks of medical importance in Kalasin Province, northeast Thailand. Southeast Asian journal of tropical medicine and public health, 36(3), 653. Disponible en: <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/TMPH/10601424.pdf>
- Suplee y Lightneer (1976). Gas-bubble disease due to oxygen supersaturation in raceway-reared California brown shrimp. En: Fidler, L. E., & Miller, S. B. (1994). British Columbia water quality guidelines for dissolved gas supersaturation. Prepared for BC Ministry of Environment, Fisheries and Oceans Canada and Environment Canada.



- Tróccoli, L.G, Herrera-Silveira, J.A. & Comin, F.A. 2004. Structural variations of phytoplankton in coastal seas of Yucatan, México. *Hydrobiologia* 519 (1-3): 85-102.
- Vaconcelos, U, Gomes, M. y Torres, G. 2010. *Pseudomonas aeruginosa* associated with negative interactions on coliform bacteria growth. *Canadian Journal of pure & applied Sciences*, 4: 1133-1139.
- Vergara, A.D. y Velásquez, L.E. 2009. Larvas de DIGENEA en *Melanoides tuberculata* (GASTROPODA: THIARIDAE), EN Medellín, Colombia. *Acta Biológica Colombiana* 14(1): 135-142. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v14n1/v14n1a08.pdf>
- Villalobos, H. e Hidalgo, J. 2011. Arsénico en el Agua Potable. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Subgerencia de Ambiente, Investigación y Desarrollo. San José, Costa Rica.
- Vivas-Aguas, L.J, Tosic, M, Narváez, S, Cadavid, B, Bautista, P, Betancourt, J, Parra, J, Carvajalino, M. y Espinosa, L. 2012. Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. –REDCAM. Informe técnico 2011. INVEMAR. Santa Marta, 229 p.
- VOLLENWEIDER, R.A. & JANUS, L.L. 1981. Statistical models for predicting hypolimnetic oxygen depletion rates. National Water Research Institute. Canada Centre for Inland Waters. Ontario. 38 p
- Weitkamp, Don E. & Katz, Max (1980): A Review of Dissolved Gas Supersaturation Literature, *Transactions of the American Fisheries Society*, 109:6, 659-702
- Welch, A., Westjohn, D., Helsel, D. & Wanty, R. 1994. Arsenic in ground water of the United States: Occurrence and Geochemistry. *Ground Water* 38(4), 589- 604.
- Wetzel, R. 1981. *Limnología*. Omega. Barcelona, España. 679 pp.
- Yunpeng, W. & Guoying, S. 2004. Water quality change in reservoirs of Shenzhen China detection. *Science of the Total Environment* 328, 195-206. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969704001007>
- Zúñiga, Ó. O., Cobas, G. G., Rivera, J. G., & Hernández, K. T. 2016. Evaluación de la turbiedad y la conductividad ocurrida en temporada seca y de lluvia en el río Combeima (Ibagué, Colombia. *Ingeniería Solidaria*, 18.





9. ANEXOS

ANEXO 1. Relación de documentos anexos al informe

Anexo	Laboratorio	Archivos	Páginas
Anexo 1. Reporte de laboratorio	SERAMBIENTE S.A.S	Reporte SERAMBIENTE S.A.S	3
	SGS COLOMBIA S.A.S	Reporte SGS COLOMBIA S.A.S	20
Anexo2. Formatos de campo	SERAMBIENTE S.A.S	Planilla de campo	4
		Plan de monitoreo	4
		Cadena de custodia	6
Anexo 3. Resolución de Acreditación del IDEAM	SERAMBIENTE S.A.S.	Resolución 1013 de 2019	11
	SGS COLOMBIA S.A.S	Prorroga de vigencia	3
		Resolución 0180 de 2020	11
Anexo 4. Graficas de curvas de calidad		Curvas de calidad y ecuaciones de los subíndices del ICAcc	13

Fuente: SERAMBIENTE S.A.S, 2021.

(FIN DEL INFORME)

