

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL HUMEDAL COSTERO PANTANOS DE VILLA, CHORRILLOS, PERÚ

EVALUATION OF WATER QUALITY IN THE PANTANS DE VILLA COASTAL WETLAND, CHORRILLOS, PERU

Luis Aguirre-Soto ¹, Jessica I. Nieto-Juárez ^{1*}

¹Grupo de Investigación en Calidad Ambiental y Bioprocesos (GICAB). Facultad de Ingeniería Química Y Textil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido (Received): 01 / 03 / 2024 Aceptado (Accepted): 18 / 04 / 2024

Publicación correspondiente al Volumen 34 n° 1

RESUMEN

La calidad de agua (parámetros de campo, aniones, metales disueltos y metales totales) en el humedal costero Pantanos de Villa fue evaluado en 14 estaciones de muestreo, que consistió en recolectar muestras de agua superficial (6), agua subterránea (4) y manantiales (4) en dos campañas de muestreo (enero y julio-agosto 2022); el análisis químico de metales y aniones en las muestras fue realizado en un laboratorio acreditado y la evaluación de la calidad del agua se realizó respecto al Estándar de Calidad Ambiental (ECA). Se determinó que la categoría 3 (Riego de Vegetales y Bebida de Animales) y 4 (Conservación del Ambiente Acuático) de los ECA para agua son aplicables al humedal costero Pantanos de Villa. Entre los parámetros medidos que excedían a los ECA en una mayor cantidad de muestras se encontró a la Conductividad Eléctrica (100%), Oxígeno Disuelto (44,44%), Cloruros (88,89%), Nitratos (59,26%), Boro Disuelto (96,30%), Boro Total (100%), Selenio Disuelto (66,67%) y Selenio Total (77,78%). El Selenio y Boro son dos metales ampliamente distribuidos en el humedal costero, en concentraciones que ponen en peligro la sostenibilidad del ecosistema y los objetivos de conservación como área natural protegida porque se bioacumulan, son persistentes y se encuentran en niveles que pueden afectar a los organismos acuáticos identificados en el humedal como *Ceriodaphnia dubia*, *Phragmites australis* y *Anas platyrhynchos*.

Palabras Clave: humedal costero, calidad de agua, conservación, aniones, metales.

ABSTRACT

In the present study, the water quality (field parameters, anions, dissolved and total metals) was evaluated in the Pantanos de Villa coastal wetland at 14 sampling stations by collecting samples of surface water (6), groundwater (4) and springs (4) in two sampling campaigns (January and July-August 2022); the chemical analysis of anions and metals in the samples was realized in an accredited laboratory and the evaluation of water quality was carried out according to the Environmental Quality Standard (ECA) for waters of Peruvian legislation. It was determined that categories 3 (Irrigation of Vegetables and Animal Drinking) and 4 (Conservation of the Aquatic Environment) of the ECA for water are applicable to the Pantanos de Villa coastal wetland. Among the parameters that exceeded the ECA for water in a greater number of samples were Electrical Conductivity (100%), Dissolved Oxygen (44,44%), Chlorides (88,89%), Nitrates (59,26%), Dissolved Boron (96,30%), Total Boron (100%), Dissolved Selenium (66,67%) and Total Selenium (77,78%). Selenium and Boron are two metals widely distributed in the Pantanos de Villa coastal wetland, in concentrations that endanger the sustainability of the ecosystem and the conservation objectives as a protected natural area because they bioaccumulate, are persistent and are found at levels that can affect aquatic organisms identified in the wetland such as *Ceriodaphnia dubia*, *Phragmites australis* and *Anas platyrhynchos*.

Keywords: coastal wetland, water quality, conservation, anions, metals.

1. INTRODUCCIÓN

El humedal costero Pantanos de Villa se encuentra ubicado en la costa central del Perú, ocupa un área de 263,27 hectáreas; y tiene como origen los afloramientos de agua subterránea desde el acuífero de Lima [1], así como la infiltración de la descarga de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas [2]. Es un humedal de alta importancia

debido a que es una muestra representativa de los Pantanos del desierto del Pacífico [3], en el cual se encuentran importantes comunidades vegetales representativas de este tipo de ecosistema, así como una zona de alimentación, reproducción, albergue, descanso y refugio de aves residentes y migratorias del continente americano [1]. Los ciclos de vida y la propia existencia de los elementos biológicos que conforman el humedal costero se sustentan en la

* Corresponding author.:
E-mail: jnieto@uni.edu.pe

disponibilidad suficiente de agua; una disminución drástica de este elemento o un incremento en sus niveles de contaminación, provocarían el desequilibrio y colapso del ecosistema [4].

Se han identificado numerosas fuentes de contaminación que afectan la calidad de agua del humedal costero Pantanos de Villa como: la descarga de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento [5], la disposición inadecuada de residuos de la construcción y demolición [6], la disposición inadecuada de residuos sólidos domésticos [7], el uso de los canales del humedal para lavado de ropa [5] y vehículos [8] y el uso de los canales para la alimentación y aseo de animales de corral [8]. Es importante precisar que estas fuentes contaminantes se han incrementado en las últimas décadas conforme la ciudad de Lima ha ido creciendo, ocupando el área del humedal; así como también, por un manejo inadecuado del recurso hídrico [6]. Es por ello, que cobra una mayor relevancia la evaluación de la calidad del agua en el humedal costero porque permite el monitoreo de las amenazas existentes y la identificación de nuevas amenazas para su conservación.

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la calidad de agua superficial y subterránea en el humedal costero a través de la toma de muestras en 14 estaciones (05 lagunas, 04 manantiales, 03 piezómetros, 01 calicata y 01 canal) en dos campañas de muestreo (época seca y época húmeda) durante el año 2022. Entre los parámetros evaluados se consideró parámetros fisicoquímicos, como los de campo (pH, conductividad eléctrica, temperatura y oxígeno disuelto), aniones (Bromuro, Cloruros, Fluoruro, Sulfatos, Bicarbonatos, Carbonatos, Fosfato, Nitratos y Nitritos), metales disueltos y metales totales.

2. ANTECEDENTES

La evaluación de la calidad de agua en humedales es un tema de investigación ampliamente desarrollado en Latinoamérica [9] en la que se han aplicado diversas metodologías para la recolección de muestras de agua, así como para la evaluación de la calidad, es importante precisar que una metodología ampliamente utilizada es la comparación de los resultados de los análisis químicos de las muestras de agua con criterios ambientales establecidos en la legislación de cada uno de los países [10], [11].

En general, los estudios de calidad de agua en humedales costeros en el Perú tienen como objetivo identificar la influencia de la calidad de agua sobre la biodiversidad, evaluando como un estudio preliminar los parámetros de campo, como lo reportado en el

2022 por Canales et al. [12], quienes realizaron una evaluación de la calidad de agua en los humedales de Ventanilla mediante la medición de parámetros de campo en dos campañas de muestreo, considerando el régimen hidrológico del humedal, y la comparación de los resultados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de la legislación peruana [13] para así evaluar su influencia sobre la abundancia de macroinvertebrados acuáticos.

En el caso del humedal costero Pantanos de Villa, las investigaciones realizadas sobre la calidad de agua, también se enfocaron en evaluar su relación con la biodiversidad y para determinar su variación temporal y espacial (diagnóstico). Entre los estudios que evaluaron la relación de la calidad de agua con la biodiversidad se tiene lo desarrollado por Córdova [14], en el 2020, quien investigó los parámetros fisicoquímicos en las lagunas del humedal costero Pantanos de Villa para identificar su influencia sobre la composición y riqueza de especies de coleópteros. La evaluación de la calidad de agua se realizó mediante la comparación con los ECA [13]. Se encontró que los valores de Conductividad Eléctrica estuvieron entre 3 140 y 52 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mostrando valores por encima de los ECA categoría 4, presentando los valores más altos en la laguna Delicias. Por otro lado, los valores de pH estuvieron entre 7,31 y 9,68, indicando aguas entre neutras a alcalinas, encontrando los valores más altos en la laguna Marvilla. Las concentraciones de Oxígeno Disuelto se encontraron entre 0,97 y 29,72 mg/L, las concentraciones más altas se presentaron en la laguna Génesis.

Entre los estudios de diagnóstico de la calidad de agua, Álvarez [15], en el 2016, realizó una evaluación de la contaminación química en los principales canales y cuerpos de agua del humedal costero Pantanos de Villa mediante el análisis químico de detergentes aniónicos y nutrientes en dos campañas de muestreo; y la comparación de los resultados con los ECA del año 2015, vigentes durante la realización de este estudio [16], encontrando resultados similares en los parámetros fisicoquímicos a los encontrados por Córdova [14]; por otro lado, se encontraron excedencias a los ECA en el parámetro fósforo total y nitrógeno Kjeldahl, indicando que los cuerpos de agua evaluados están en un estado hipereutrófico.

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), en el 2019 [7], realizó una evaluación de la calidad de agua en el humedal costero Pantanos de Villa como parte de un estudio hidrogeológico. Se recolectaron once muestras en total de agua superficial, agua subterránea y agua de mar en enero de 2018, y se compararon los resultados con los ECA

considerando las categorías (Cat.) de uso 1, 3 y 4. Se encontraron excedencias a los ECA Cat. 1 en aniones (Cloruros, Sulfatos, Nitritos y Nitratos) y metales totales (Arsénico Total) en los manantiales del humedal costero; asimismo, se encontraron excedencias a los ECA Cat. 3 en aniones (Cloruros, Nitratos + Nitritos) y metales totales (Boro Total) en los manantiales y una calicata; y a los ECA Cat. 4 en aniones (Nitratos) y metales totales (Talio Total) en las lagunas Génesis, Marvilla y Mayor. Por otro lado, se encontraron excedencias a los ECA en los valores de Conductividad Eléctrica en las tres categorías y en todas las estaciones de muestreo evaluadas, así como de pH, en las lagunas Génesis, Marvilla y Mayor debido a que presentaron valores alcalinos.

Entre otras evaluaciones en las que se realiza un diagnóstico de la calidad de agua en el humedal costero Pantanos de Villa, en el 2021, se tiene a las realizadas por Human-Vilca et al. [17] y Enrique-Ayala et al. [18] en las que se tomaron muestras de agua en la laguna Marvilla y los canales que transportan el agua desde los afloramientos hasta el humedal considerando parámetros fisicoquímicos, nutrientes, DBO₅, Aceites y Grasas, Detergentes, parámetros microbiológicos y Metales Totales (Plomo, Mercurio, Cadmio y Arsénico). Los resultados de los análisis químicos se compararon con los ECA Cat. 3 y 4 y se determinó el índice de calidad de agua (ICA-PE) mediante la metodología aprobada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en el año 2018 [19]. Entre los principales resultados se encontró que los valores de pH, Conductividad Eléctrica, Nitratos, Fósforo Total y Coliformes Termotolerantes en la laguna Marvilla presentaron excedencias a los ECA evaluados. En los canales del humedal costero se encontró que las concentraciones de Nitrato, Fósforo Total, Oxígeno Disuelto, DBO₅ y *Escherichia coli* estuvieron fuera del rango de los ECA. Entre las causas asociadas a estas excedencias se indicó a factores naturales (presencia de algas y cercanía a la costa) y factores antropogénicos (descargas de aguas residuales domésticas, la presencia de excretas de animales y la disposición inadecuada de residuos sólidos). Por otro lado, las bajas concentraciones de metales pesados fueron asociados a la presencia de especies macrófitas con capacidad de absorber o acumular este tipo de contaminantes.

3. METODOLOGÍA

3.1 Campañas de muestreo del agua

Con el objetivo de realizar la evaluación de la calidad de agua en el humedal costero Pantanos de Villa se realizaron dos campañas de muestreo considerando época seca (enero 2022) y época húmeda (julio-agosto 2022), en el que se recolectaron

muestras de agua superficial (6), subterránea (4) y manantiales (4) en 14 estaciones descritas en la **Tabla I** y la ubicación se muestra en la **Figura 1**. Es importante precisar que la ubicación de las estaciones se seleccionó considerando la evaluación de los cuerpos de agua más representativos del humedal (lagunas y manantiales), y la colecta de muestras de agua subterránea en piezómetros y calicata ubicados dentro del humedal. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos de campo (pH, Conductividad Eléctrica, Temperatura y Oxígeno Disuelto), aniones (Bromuro, Cloruros, Fluoruro, Sulfatos, Bicarbonatos, Carbonatos, Fosfato, Nitratos y Nitritos), metales disueltos y metales totales. La medición de los parámetros fisicoquímicos de campo se realizó *in situ* con un equipo multiparámetro portátil WTW modelo Multiline (WTW 3630). La determinación de aniones (EPA 300. Rev. 2.1:1993. Determination of Inorganic Anions by Ion Chromatography; SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 23rd Ed: 2017. Alkalinity Titration Method), metales disueltos y metales totales (EPA 200.8; Rev 5.4:1994. Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry, ICP-MS) se realizaron en el laboratorio SGS del Perú S.A.C. que se encuentra acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL).

El procedimiento de muestreo del agua superficial se realizó de acuerdo con el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de Recursos Hídricos Superficiales aprobado por la ANA en el 2016 [20]; mientras que, las muestras de agua subterránea se realizaron de acuerdo con el Manual de Buenas Prácticas en la Investigación de Sitios Contaminados Muestreo de Aguas Subterráneas [21].

Cada campaña de muestreo se realizó en dos jornadas de trabajo considerando cinco etapas: (1) verificación del equipo multiparámetro, (2) medición de parámetros de campo, (3) muestreo del agua, (4) preservación de las muestras y (5) transporte de muestras; en el caso del muestreo en agua subterránea, previo a la recolección de las muestras y medición de parámetros de campo, se realizó el cálculo del volumen de la columna de agua a purgar en los piezómetros. La verificación de la calibración del equipo multiparámetro se realizó en cada jornada de trabajo mediante la medición de soluciones patrón de pH (4,01, 7,01 y 10,01) y Conductividad Eléctrica (1 413 $\mu\text{S}/\text{cm}$). El muestreo del agua superficial se realizó utilizando brazos extensores, botes o mediante el ingreso a los cuerpos de agua con un traje Wader; mientras que, en las muestras de agua subterránea se utilizó una sonda de nivel para la medición del nivel de agua subterránea y bailers de 1,025 L para el purgado y colecta de muestras. Es importante precisar que en el purgado de los piezómetros se extrajo como mínimo tres

veces el volumen que contenían hasta alcanzar la estabilización de parámetros de campo (pH, Conductividad Eléctrica y Temperatura). La preservación de las muestras se realizó de acuerdo con los requerimientos de los análisis químicos

(según laboratorio SGS) y se almacenaron a 4 °C en coolers para su posterior análisis en el laboratorio. El envío de las muestras al laboratorio para su análisis se realizó con una frecuencia diaria.

TABLA I

Descripción de las Estaciones de Muestreo del agua en el humedal costero Pantanos de Villa	Coordenadas de Ubicación (Datum WGS 84)	
	Este	Norte
Agua Superficial		
Laguna Delicias	282 933	8 650 500
Laguna Marvilla	283 613	8 647 907
Laguna Mayor	283 314	8 649 638
Laguna Génesis	283 687	8 649 262
Laguna ANAP	284 142	8 648 415
Canal Sur	283 801	8 648 100
Manantiales		
Manantial Palmeras	284 860	8 649 765
Manantial Villa Baja	284 717	8 649 719
Manantial Miramar	284 528	8 649 831
Manantial Terrazas	284 384	8 649 937
Agua Subterránea		
Piezómetro 19	283 285	8 650 220
Piezómetro 04	283 479	8 649 198
Piezómetro 25	283 325	8 649 146
Calicata Canal Sur	283 870	8 648 431

3.2 Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC)

Se prepararon muestras blanco viajero, blanco de campo y duplicado como método para el aseguramiento y control de la calidad durante la realización de las campañas de muestreo con el objetivo de estimar el sesgo causado por la contaminación introducida durante el muestreo del agua y evaluar la variabilidad (error aleatorio) de los resultados obtenidos [20, 22]. En cada campaña de muestreo se prepararon dos muestras blanco viajero y de campo, uno por cada jornada de trabajo y por viaje realizado, considerando los siguientes parámetros: aniones (Bicarbonatos, Carbonatos, Bromuro, Sulfatos, Cloruros, Fluoruros, Fosfatos, Nitritos y Nitratos) y metales disueltos. Asimismo, se prepararon 14 muestras duplicado uno por cada estación de muestreo, así como cuatro muestras duplicado considerando los mismos parámetros de las muestras blanco de campo.

Como criterio de aceptabilidad de las muestras blanco de campo y viajero se estableció que el número de resultados por encima del límite de detección (L.D.) deben ser menores al 5% del total de parámetros evaluados [23], asimismo los resultados deben ser al menos cinco veces mayores que el límite de detección para considerarse significativos [24]. El criterio de aceptabilidad para las muestras duplicado del presente estudio fue que el valor de la diferencia

porcentual relativa (%DPR) debe ser menor a 20% [22], calculado mediante la ecuación 1.

$$\%DPR = 200 \times \left[\frac{|R_M - R_D|}{R_M + R_D} \right], \quad (1)$$

Donde R_M es el resultado encontrado en una muestra y R_D es el resultado encontrado en su muestra duplicado.

De manera adicional se consideró como método de aseguramiento y control de la calidad el Error en el Balance Iónico (%EBI) debido a que es un indicador de la calidad de los análisis desarrollados por los laboratorios [25]. La ecuación 2 fue utilizada para calcular %EBI.

$$\%EBI = \frac{(\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones})}{(\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones})} \times 100, \quad (2)$$

Donde $\sum \text{Cationes}$ corresponde a la sumatoria de los cationes en miliequivalentes por litro (meq/L) y $\sum \text{Aniones}$ corresponde a la sumatoria de los aniones en miliequivalentes por litro (meq/L). Como criterio de aceptabilidad se consideró que el %EBI no debe ser superior al $\pm 10\%$ [26].

Otro criterio para el control y aseguramiento de la calidad de los resultados fue la comparación de los resultados entre metales totales y disueltos, se consideró como criterio de aceptabilidad que todos los resultados de metales disueltos deben ser menores o iguales que los resultados de metales totales, esto debido a que los metales disueltos son

una fracción de los metales totales que atraviesa un filtro con un tamaño de poro de $0,45 \mu\text{m}$ [27].

3.3 Evaluación de la Calidad del Agua

La evaluación de la calidad de agua se realizó mediante la comparación con el criterio ambiental establecido en la legislación peruana, los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) aprobados mediante D.S. N° 004-2017-MINAM [13], y que se encuentran definidos en [28].



Fig. 1. Ubicación de las Estaciones de Muestreo de agua superficial, agua subterránea y manantiales en el humedal costero Pantanos de Villa; las fotos muestran algunas estaciones representativas (a) laguna Delicias, (b) laguna Mayor, (c) laguna Marvilla, (d) manantial Palmeras, (e) Piezómetro 25 y (f) laguna ANAP.

La aplicación de los ECA se determinó en función de la categoría de uso del agua, la cual se establece de acuerdo con la R.J. N° 056-2018-ANA [29], que indica que todas las lagunas, salvo excepción indicado por la ANA, les corresponde la Categoría 4: Conservación de Ambiente Acuático, específicamente la Subcategoría E1 Lagunas y Lagos (Cat. 4-E1) y en el caso de los canales y afluentes de las lagunas se considera los ECA Cat. 4-E2: Ríos Costa y Sierra, de acuerdo con la Tercera Disposición Complementaria Transitoria del D.S. N° 004-2017-ANA. En adición a lo anterior, las muestras de agua superficial y subterránea se compararon, de manera referencial, con los ECA Cat. 3 Riego de Vegetales y Bebida de Animales debido a que se identificó que las aguas del humedal costero Pantanos de Villa son

utilizadas para el riego de áreas verdes [30] y como abrevadero de animales de corral [8]. Cabe precisar que en la legislación peruana no se han establecido ECA para agua subterránea ni manantiales, por lo que, de manera referencial se compararon los resultados de las muestras de agua subterránea y manantiales con los ECA Cat. 3 y 4.

Asimismo, no se ha establecido valores ECA para los metales disueltos, por lo que, de manera referencial se comparó los resultados de estos parámetros con los ECA Cat. 3-D1, 3-D2 y 4-E2, considerando los valores establecidos para metales totales.

Entre otros criterios ambientales utilizados en el presente estudio para determinar la calidad de agua en el humedal costero se tiene a la clasificación de las aguas de acuerdo con los valores de Conductividad Eléctrica según J. D. Rhoades et al. [31].

La descripción de los resultados se realizará considerando el tipo de muestra (agua superficial y agua subterránea), en ese sentido se tiene las siguientes agrupaciones: agua superficial (lagunas y canal), agua subterránea (piezómetros y calicata) y manantiales.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC)

Los resultados mostraron que el nivel de contaminación introducido durante la realización de las campañas de muestreo es aceptable de acuerdo con los criterios establecidos en el presente estudio, debido a que solo se encontró un parámetro (Cloruros; 0,564 mg/L) que estuvo por encima del Límite de Detección (LD; 0,025 mg/L) en una muestra blanco de campo preparada en la laguna Marvilla durante la campaña de muestreo en época seca (enero 2022), la cual está asociada a las condiciones naturales de la zona donde fue preparada. Por otro lado, debido a que el resultado de cloruros en esta muestra blanco estuvo varios órdenes de magnitud por debajo de los registrados en los alrededores de la laguna Marvilla (entre 928,02 mg/L y 1 073,6 mg/L) se le consideró poco significativo.

Con respecto al nivel de contaminación introducido durante el transporte de las muestras desde el humedal costero Pantanos de Villa hasta el laboratorio acreditado para su análisis, los resultados obtenidos fueron aceptables de acuerdo con los criterios establecidos en el presente estudio debido a que los resultados de las muestras blanco viajero fueron por lo general menores al límite de cuantificación (LC), a excepción de un resultado de cloruros (0,077 mg/L) durante la campaña de muestreo en época seca (enero 2022) que fue mayor al LD (0,025 mg/L) y LC (0,050 mg/L) pero menor a cinco veces el LD, por lo que fue considerado no significativo.

La precisión de los resultados en las dos campañas de muestreo fue aceptable de acuerdo con los criterios establecidos en el presente estudio debido a que se encontraron resultados %DPR entre 0% y 19,29%. Los resultados en el error del balance iónico (%EBI) estuvieron entre -7,65% y 9,60%, todos dentro del rango aceptable: $\pm 10\%$ (ver Fig. 2); asimismo, los resultados de metales totales siempre fueron

mayores o iguales a los resultados de metales disueltos.

De acuerdo con los resultados de la metodología de control y aseguramiento de la calidad, se puede indicar que los resultados obtenidos de las campañas de muestreo realizadas como parte del presente estudio son representativas de las condiciones ambientales encontradas en el humedal costero Pantanos de Villa.

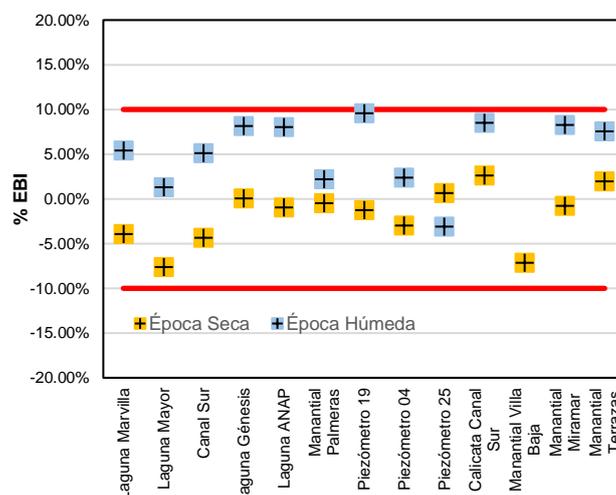


Fig. 2. Error en el Balance Iónico (%EBI) en las Estaciones de Muestreo del Humedal Costero Pantanos de Villa

4.2 Evaluación de la Calidad de Agua

En las muestras de agua superficial (lagunas y canal) del humedal costero Pantanos de Villa se encontraron excedencias a los ECA Cat. 4-E1 y 4-E2 en seis parámetros (pH, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Nitratos, Selenio Disuelto y Selenio Total), a los ECA Cat. 3-D1 en once parámetros (pH, Conductividad Eléctrica, Bicarbonatos, Cloruros, Sulfatos, Boro Disuelto, Boro Total, Manganeso Disuelto, Manganeso Total, Selenio Disuelto y Selenio Total) y a los ECA Cat. 3-D2 en ocho parámetros (pH, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Sulfatos, Magnesio Disuelto, Magnesio Total, Manganeso Disuelto y Manganeso Total).

En las muestras de agua recolectadas en los manantiales se encontraron excedencias a los ECA Cat. 4-E2 en cinco parámetros (Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Nitratos, Selenio Disuelto y Selenio Total), a los ECA Cat. 3-D1 en siete parámetros (Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Cloruros, Boro Disuelto, Boro Total, Selenio Disuelto y Selenio Total) y a los ECA Cat. 3-D2 en dos parámetros (Conductividad Eléctrica y Oxígeno Disuelto).

Finalmente, en las muestras de agua subterránea (piezómetros y calicata) se encontraron excedencias a los ECA Cat. 4-E2 en seis parámetros (Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Nitrato, Selenio Disuelto, Selenio Total y Plomo Total), a los ECA Cat. 3-D1 en trece parámetros (Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Cloruros, Bicarbonatos, Sulfatos, Boro Disuelto, Boro Total, Hierro Total, Litio Disuelto, Litio Total, Manganeso Total, Selenio Disuelto y Selenio Total) y a los ECA Cat. 3-D2 en doce parámetros (Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Sulfatos, Boro Disuelto, Boro Total, Litio Disuelto, Litio Total, Magnesio Disuelto, Magnesio Total, Manganeso Total, Selenio Disuelto y Selenio Total).

La **Tabla II** muestra el resumen de los parámetros que excedieron a los ECA para agua en las campañas de muestreo realizadas en el 2022. La **figura 5** muestra los resultados de los parámetros relevantes que presentaron excedencias con mayor frecuencia a los ECA para agua en las estaciones de muestreo del humedal costero Pantanos de Villa en el año 2022.

Parámetros de campo

Los valores de pH en las muestras de agua superficial (lagunas y canal) estuvieron entre 7,52 y 9,78, en las aguas subterráneas (piezómetros) variaron de 6,71 a 7,67 y en los manantiales estuvieron de 7,28 a 7,62 en las dos épocas de muestreo (enero y julio-agosto 2022). Los valores más altos de pH se presentaron en la laguna Marvilla (9,3 y 9,78), los cuales estaban acorde con los registrados por Huaman-Vilca et al. [17] (entre 8,7 y 9,1) en el año 2020, por el INGEMMET en 2018 [7] y por Córdova Tello, et al. en el 2017 [14] (entre 8,68 y 9,4); mientras que, entre julio de 2005 [32] y julio 2014 [15] fue ligeramente ácido a ligeramente alcalino (entre 5,59 y 8,44); por lo que, se podría indicar que la laguna está experimentando un proceso de alcalinización. Estos valores alcalinos de pH en la laguna Marvilla se puede deber a la alta actividad fotosintética realizada por algas y plantas acuáticas [33], [34], que incrementan la concentración de oxígeno disuelto (como los valores registrados en el presente estudio, durante el día, 17,92 y 17,8 mgO₂/L); a su vez, se podría deber al incremento en la concentración de Nitratos que varió de 3,78 (abril de 2005, [32]) a 192,31 mg/L (agosto 2022) asociado a fuentes antropogénicas.

TABLA II
Parámetros que Excedieron a los ECA en el Humedal Costero Pantanos de Villa en el año 2022

Parámetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	N° DE Excedencias a los ECA			
			Cat. 3-D1	Cat. 3-D2	Cat. 4-E1	Cat. 4-E2
pH	6,71	9,78	5/27	5/27	3/27	3/27
Conductividad Eléctrica (µS/cm)	2500	45 233	27/27	19/27	27/27	27/27
Oxígeno Disuelto (mg/L)	0,12	19,59	8/27	12/27	12/27	12/27
Bicarbonato (mg/L)	28,6	1 464,9	9/27	-	-	-
Cloruros (mg/L)	329,95	17 761,45	24/27	-	-	-
Sulfatos (mg/L)	249,85	3 042,15	8/27	8/27	-	-
Nitrato (mg/L)	<0,062	325,10	-	-	16/27	6/27
Boro Disuelto (mg/L)	0,669	10,1	26/27	2/27	-	-
Litio Disuelto (mg/L)	0,0425	3,00	2/27	2/27	-	-
Magnesio Disuelto (mg/L)	24,60	1 164,24	-	6/27	-	-
Manganeso Disuelto (mg/L)	<0,0010	0,305	1/27	1/27	-	-
Selenio Disuelto (mg/L)	0,0025	0,032	4/27	-	18/27	18/27
Boro Total (mg/L)	1,205	11,39	27/27	2/27	-	-
Hierro Total (mg/L)	<0,0013	7,064	2/27	-	-	-
Litio Total (mg/L)	0,077	3,025	2/27	2/27	-	-
Magnesio Total (mg/L)	26,69	1 231,97	-	6/27	-	-
Manganeso Total (mg/L)	0,0014	0,331	2/27	2/27	-	-
Plomo Total (mg/L)	<0,0006	0,0042	-	-	1/27	1/27
Selenio Total (mg/L)	0,0031	0,039	5/27	-	21/27	21/27

Por otro lado, los valores altos de pH contribuyen a la precipitación de metales debido a que forman hidr(óxidos) o carbonatos insolubles [34]. Entre los principales efectos biológicos por los valores de pH altos se encuentra el deterioro de las branquias, ojos y piel de los peces, así como una afectación del sistema olfativo, lo que obstaculiza la detección de comida, feromonas y otras sustancias químicas [33].

La concentración más baja de Oxígeno Disuelto (O.D.) en las muestras de agua superficial se presentó en la laguna Delicias en época seca (4,09 mg O₂/L), asociado a los valores de Conductividad Eléctrica elevados registrados en esta laguna (45 233 µS/cm) y a la reducción de la columna de agua a niveles históricamente bajos durante la época seca del año 2022 (ver Fig. 3), que produjo una disminución del volumen de agua en la laguna, y, por lo tanto, las

poblaciones de peces se encontrarían en un espacio más pequeño, generando una disminución de O.D. como resultado de la respiración [35]. La Figura 3, muestra la variación de la columna de agua (en cm) en la laguna Delicias, elaborada a partir de los registros de la regla limnigráfica L20 en el período 2011-2023, cuyos datos fueron proporcionados por la Autoridad Municipal de los Pantanos de Villa-Prohvilla. En todas las muestras de aguas subterráneas (entre 0,12 y 4,42 mg/L) y en los manantiales (2,22 y 4,08 mg/L Palmeras y Villa Baja, respectivamente), se presentaron resultados de O.D. que estuvieron, por debajo de los ECA Cat 4-E1 y E2. Cabe indicar que los efectos nocivos de las sustancias tóxicas se magnifican en los organismos acuáticos debido al estrés generado como resultado de un medio con concentraciones inadecuadas de O.D. [34].

Los valores de Conductividad Eléctrica (C.E.) en las muestras de agua superficial estuvieron entre 4 056 y 45 233 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando aguas con salinidad moderada a salmueras; en las muestras de los manantiales se encontraron registros entre 2 500 y 9 576 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando aguas con salinidad moderada; y en las muestras de agua subterránea se encontraron registros entre 7 900 y 33 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, revelando aguas con salinidad moderada a aguas con salinidad muy alta. Los resultados más altos se presentaron en la laguna Delicias (25 800 y 45 233 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en época húmeda y seca), cuyos resultados fueron similares a lo reportado entre julio 2017 y febrero 2018 (15 187,5 y 43 535 $\mu\text{S}/\text{cm}$) por Córdova Tello [14]; a diferencia de DIGESA que encontró valores de 10 290 y 11 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el 2006 [36] y de los resultados encontrados en el piezómetro 19 (27 300 y 25 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en época seca y húmeda 2022), ubicado en el entorno de la laguna Delicias (ver Fig. 1). Este considerable incremento de la C.E. en la laguna podría deberse a las altas concentraciones de Cloruros (Cl^-) registrados en el humedal costero, debido a que se encontró una alta correlación entre ambos parámetros ($R^2=0,99$; como se muestra en la Fig. 4); otra explicación podría ser por la disminución de la fuente de recarga que genera una disminución del nivel de agua (Fig. 3) y una sobresaturación de iones en la laguna, lo que explica la diferencia entre los valores registrados en la laguna Delicias y en el piezómetro 19, debido a que este último al tratarse de una muestra de agua subterránea es menos susceptible a la evaporación, y, por lo tanto, presentó valores más bajos de C.E. durante época seca y valores similares a los encontrados en la laguna Delicias durante época húmeda.

Entre las fuentes que incrementan los valores de C.E. y Cl^- en el humedal costero Pantanos de Villa se encuentran el transporte de sedimentos finos desde una terraza marina [7], la presencia de eflorescencias

de evaporitas en los alrededores de la laguna Delicias y Mayor [37], los vertimientos de efluentes industriales sin tratamiento e informales [38] y la disposición de residuos de construcción y demolición [7].

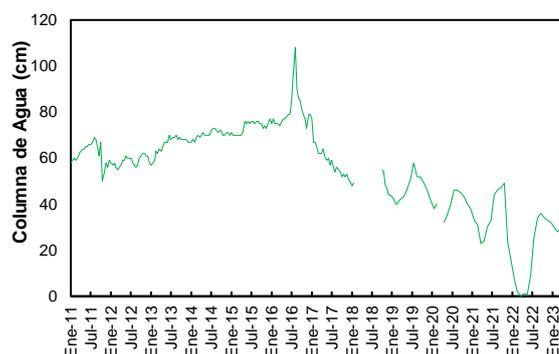


Fig. 3. Variación Columna de Agua (cm) en Laguna Delicias

Con respecto a la toxicidad en organismos, los valores altos de C.E. generan una reducción de la actividad fotosintética en las plantas acuáticas [39], lo que explicaría la baja concentración de Oxígeno Disuelto registrada en la laguna Delicias. Asimismo, el amplio rango de valores de C.E. registrada en el humedal costero Pantanos de Villa tiene una influencia en la distribución de especies que comprenden el humedal costero [14], [39].

Aniones

Se encontró una ligera excedencia a los ECA Cat. 3-D1 (518 mg/L) en la concentración de Bicarbonato en la laguna ANAP durante época húmeda (527,5 mg/L); mientras que, todas las muestras de agua subterránea presentaron resultados de Bicarbonatos (entre 598,5 y 1464,9 mg/L) por encima de los ECA Cat. 3-D1 en las dos campañas de muestreo. Es conocido, que, las aguas con alta concentración de bicarbonato tienden a convertirse a carbonatos a $\text{pH} > 8$, haciéndola no adecuada para el riego debido a la posible formación de costras blancas sobre los cultivos (en las hojas o frutos), dificultando la absorción de nutrientes como el Zinc e incrementando el pH del suelo [40].

Todos los registros de Cl^- en las muestras de agua superficial (entre 835,9 y 17 761,45 mg/L) y agua subterránea (de 1795,8 a 12 410,06 mg/L) estuvieron muy por encima de los ECA Cat. 3-D1 (500 mg/L); mientras que, en los manantiales se presentaron excedencias en el manantial Miramar (2 473,51 y 2 566,37 mg/L) y manantial Terrazas (1 738,96 y 1 859,17 mg/L) en la época seca y húmeda, respectivamente (como se muestra en la Fig. 5c y 5d). La laguna Delicias presentó las concentraciones más altas de Cl^- (17 761,45 mg/L en época seca, enero 2022), similares a las encontradas en el agua de mar (19 250 mg/L) [41]. La toxicidad de los Cloruros es mayor en cuerpos de

agua con bajas concentraciones de Oxígeno Disuelto (O.D.); como el caso de la laguna Delicias, que presenta bajas concentraciones de O.D. (4,09 mg O₂/L en época seca) y, por ende, sería la más afectada por las altas concentraciones de este parámetro. Es importante resaltar que, durante la época húmeda del año 2022, en esta laguna se presentó una reducción en la concentración de Cloruros (9 062,8 mg/L) y un incremento en la concentración de O.D. (11,11 mg/L) asociado a una reducción de la salinidad [35] y un mayor volumen de agua en esta laguna (ver Fig. 3).

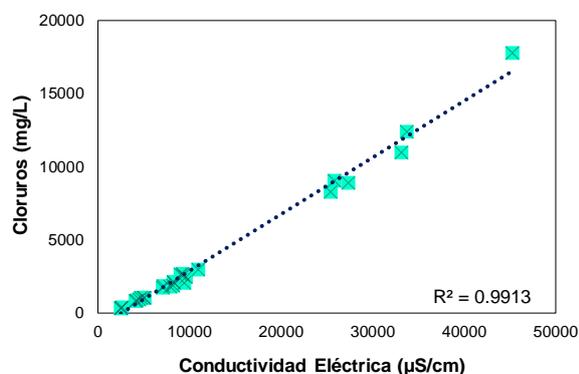


Fig. 4. Relación entre Conductividad Eléctrica (µS/cm) y Cloruros (mg/L) en el humedal costero Pantanos de Villa, medidos en el 2022.

Es conocido, que, las altas concentraciones de Cl⁻ dificultan la absorción del nitrógeno (Nitratos) y Fósforo (Fosfatos) en las plantas [42]. Por otro lado, las especies de animales invertebrados son más sensibles a la exposición de altas concentraciones de Cl⁻ que los peces [41], se ha registrado que a 342 mg/L de Cl⁻ se reduce la tasa de reproducción de *Ceriodaphnia dubia* (conocidas como pulgas de agua dulce e identificada en el humedal costero [43]) hasta en un 12,8% considerando aguas con una dureza de 100 mg CaCO₃/L; mientras que, en aguas duras (800 mgCaCO₃/L), el LC₅₀ a una exposición de 48 horas, es de 1 909 mg/L [41].

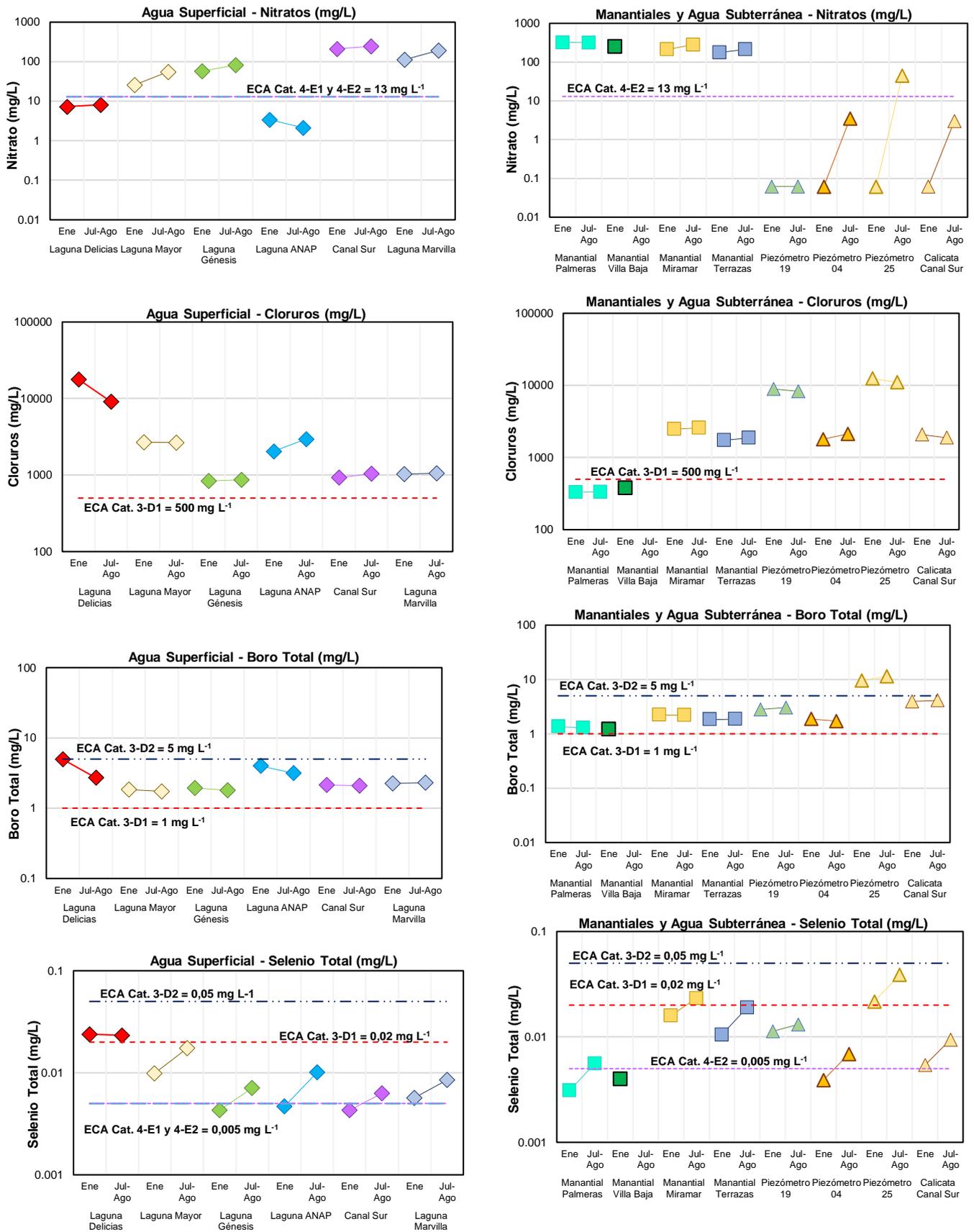


Fig. 5. Parámetros químicos que exceden los ECA en el humedal costero Pantanos de Villa con mayor frecuencia. (a) Nitratos – Agua Superficial, (b) Nitratos – Manantiales y Agua Subterránea (c) Cloruros – Agua Superficial, (d) Cloruros – Manantiales y Agua Subterránea, (e) Boro Total – Agua Superficial, (f) Boro Total – Manantiales y Agua Subterránea, (g) Selenio Total – Agua Superficial y (h) Selenio Total – Manantiales y Agua Subterránea.

Por lo que, es más probable encontrar dichas especies de invertebrados en las lagunas del humedal costero con concentraciones más bajas de Cloruros.

Los resultados de Sulfatos (SO_4^{2-}) en las lagunas Delicias y ANAP (entre 1 335,38 y 2 355,55 mg/L), así como en los piezómetros 19, 04 y 25 (entre 1 144,65 y 3 042,15 mg/L) estuvieron por encima de los ECA Cat. 3-D1 y 3-D2 (1 000 mg/L, en ambas categorías) en ambas épocas del año, a excepción de los registros en época seca en laguna ANAP (660,01 mg/L) y el Piezómetro 04 (985,84 mg/L). La toxicidad de SO_4^{2-} se expresa en la obstaculización de la absorción del calcio en las plantas [42]; por otro lado, las elevadas concentraciones de SO_4^{2-} favorecen la biodisponibilidad del Fósforo lo que hace a los cuerpos de agua más vulnerables a la eutrofización y a su vez, favorecen la biodisponibilidad del Mercurio mediante un aumento en su tasa de metilación (formación de metilmercurio) [44]. Con respecto a la toxicidad en organismos acuáticos, se ha identificado que los niveles de SO_4^{2-} registrados en la laguna Delicias (2 355,55 mg/L) durante época seca, son similares al LC50 (2 526 mg/L) para la *Ceriodaphnia dubia*, considerando una exposición de 48 horas y aguas con una dureza moderada (106 mg CaCO_3 /L) [44], es importante precisar que durante época húmeda en esta laguna se presentaron resultados (1 527,24 mg/L) por debajo de este LC50. Adicionalmente, las concentraciones de SO_4^{2-} encontradas en las lagunas Delicias (1 527,24 y 2 355,55 mg/L) y ANAP (1 335,38 mg/L en época húmeda) no son adecuadas como fuente de bebida para animales rumiantes debido a que pueden ocasionar Polioencefalomacia (lesiones necróticas en el cerebro), alteración del metabolismo y reducción en la producción de carne [44]. Entre las fuentes de Sulfatos identificadas en el humedal costero se tiene a los vertimientos de efluentes domésticos e industriales sin tratamiento e informales [38].

Las concentraciones de Nitratos (NO_3^-) en las lagunas (Mayor, Génesis y Marvilla) y en el Canal Sur fueron por lo general valores más altos (de 25,76 a 244,15 mg/L) que los ECA Cat. 4-E1 y Cat. 4-E2 (13 mg/L, en ambas categorías); por su parte, en las muestras de agua subterránea se registraron excedencias al ECA Cat. 4-E2 solo en el Piezómetro 25 (44,71 mg/L) durante época húmeda. Las concentraciones más altas de NO_3^- se presentaron en los manantiales (176,71 y 325,10 mg/L), todos sus registros estuvieron muy por encima de los ECA Cat. 4-E2, como se muestra en la **Fig. 5a y 5b**. La toxicidad del NO_3^- en los organismos de vida acuática se podría manifestar mediante la formación de metahemoglobina, reduciendo la capacidad de la sangre de transportar oxígeno y alternado el proceso de osmorregulación [45]. Se encontró que las concentraciones registradas

en las muestras de agua superficial (laguna Mayor, laguna Génesis, laguna Marvilla y Canal Sur) y en los manantiales, son superiores a 50 mg/L, pudiendo influir en la reproducción de los macroinvertebrados (*Ceriodaphnia dubia*), debido a que este valor (50 mg/L) es la concentración mínima de inhibición en la reproducción que se presenta en un 25% (IC25) de individuos en una población de esta especie considerando una exposición de 7 días [45]. Entre las principales fuentes antropogénicas de NO_3^- en el humedal costero se encuentra la presencia de vertimientos de efluentes industriales y domésticos sin tratamiento e informales [38].

Metales

Por lo general, las concentraciones de las fracciones disuelta y total de Boro en todas las estaciones de agua superficial, manantiales y agua subterránea estuvieron entre 1,02 y 11,39 veces por encima del ECA Cat. 3-D1 (1 mg/L) durante las dos campañas de muestreo (época seca y húmeda, 2022), como se muestra en la **Figura 5e y 5f**; en el Piezómetro 25 se registraron concentraciones por encima del ECA Cat. 3-D2 (5 mg/L) de hasta 11,39 mg/L en época húmeda (agosto 2022). Asimismo, se encontró que las concentraciones en la laguna Delicias (4,96 mg/L) y Calicata Canal sur (4,09 mg/L) son similares a las concentraciones reportadas en el agua de Mar (4,5 mg/L) [46]. Es importante precisar que estos resultados de Boro se encuentran por encima de la máxima concentración (4 mg/L) de no efecto (NOEC) sobre el crecimiento y daños en tejidos como en las hojas de *Phragmites australis* [47], [48], comúnmente conocido con el nombre de carricito que ha sido identificado en los totorales y espejos de agua del humedal costero Pantanos de Villa [49], [50]. Entre las probables fuentes naturales de Boro presentes en el humedal costero Pantanos de Villa están los sedimentos marinos transportados por el viento y los aerosoles marinos con alto contenido de Boro que llegarían a los cuerpos de agua mediante deposición atmosférica [46]. Otra probable fuente de Boro es la combustión de la biomasa que se produce durante los incendios reportados en el humedal costero [51]. Entre las fuentes antropogénicas de Boro se tiene a la descarga de aguas residuales domésticas [38].

Se encontraron concentraciones de Hierro Total por encima del ECA Cat. 3-D1 (5 mg/L) en la Calicata Canal Sur (5,759 y 7,064 mg/L en las dos campañas de muestreo), las cuales podrían estar asociadas a la acidificación del suelo y a una pérdida en la disponibilidad de elementos esenciales para las plantas como el fósforo y el molibdeno [40].

Las concentraciones de las fracciones disueltas (2,740 y 2,999 mg/L) y total de Litio (2,859 y 3,025 mg/L) en el Piezómetro 25 estuvieron por encima de los ECA Cat. 3-D1 y 3-D2 (2,5 mg/L, en ambas categorías); por lo que, no es recomendable el uso de estas aguas para el riego de cultivos debido a que es tóxico para ciertos tipos de plantas como los cítricos [40].

Las concentraciones de las fracciones disueltas (401,76 mg/L y 743,58 mg/L) y total (412,26 mg/L y 810,705 mg/L) de Magnesio en la laguna Delicias estuvieron muy por encima de los ECA Cat. 3-D2 (250 mg/L) en ambas épocas del año 2022, así como las concentraciones que se presentaron en el Piezómetro 19 (fracción disuelta: 297,84 - 354,33 mg/L y fracción total: 315,65 - 383,46 mg/L) y en el Piezómetro 25 (fracción disuelta: 1 041,85 - 1 164,24 mg/L y fracción total: 1 081,57 - 1 231,97 mg/L). Estas altas concentraciones de Magnesio podrían contribuir a un incremento en la dureza del agua, las cuales pueden mitigar los efectos tóxicos de Cloruros [41], Sulfatos [44], Nitratos [45], Manganeso y otros metales [34] que pueden encontrarse en el humedal costero Pantanos de Villa. Por otro lado, el riego con aguas con alto contenido de Magnesio reduce la productividad de cultivos [42]. Es importante precisar que las concentraciones encontradas en la laguna Delicias no la hacen apta como fuente de agua para la bebida del ganado, equinos y aves de corral [40].

Las concentraciones de Manganeso Disuelto (0,305 mg/L) y Total (0,330 mg/L) registradas en la laguna Delicias y la concentración de Manganeso Total en el Piezómetro 19 (0,205 mg/L) estuvieron por encima de los ECA Cat. 3-D1 y Cat.3-D2 (0,2 mg/L, en ambas categorías) durante la campaña en época seca (enero 2022). La elevada concentración de este parámetro podría estar asociada a las altas concentraciones de Cloruros, Nitratos y Sulfatos que se presentaron en la laguna Delicias durante la época seca, así como a las condiciones hipóxicas que presentó esta laguna, aumentando la movilidad de este metal [52]. Las concentraciones encontradas en las muestras de agua superficial se encuentran por debajo de la concentración normalizada (3,194 mg/L, [52]) que produce un impedimento en la reproducción en el 10% de una población de *Ceriodaphnia dubia* considerando una exposición de 7 días. Por otro lado, el uso del agua de la laguna Delicias no sería apta para el riego debido a que pueden causar inflamación de la pared celular y daños en las hojas, así como una interrupción de la actividad fotosintética de las plantas en suelos ácidos [40], [41], [53].

Se encontró solo una excedencia de Plomo Total a los ECA Cat. 4-E2 (0,0025 mg/L) en el piezómetro 04

(0,0042 mg/L) durante época húmeda (julio 2022). Por lo general, en las estaciones de agua subterránea las concentraciones de Plomo Total fueron más altas durante época húmeda (0,0018 a 0,0042 mg/L) que en época seca (<0,0006 a 0,0016 mg/L). La concentración encontrada en el Piezómetro 04 se encuentra por encima de la concentración (0,0038 mg/L) que ocasiona una reducción de un 41% de la fototaxia de una especie de copépodo (*Diaptomus sicilis*), en aguas con moderada dureza (135 mg-CaCO₃/L) [54], es importante indicar que el agua subterránea en el humedal costero Pantanos de Villa se encuentra interrelacionada con los cuerpos de agua superficial, por lo que la presencia de altas concentraciones de este parámetro en el agua subterránea podría incrementar las concentraciones de iones que se presentan en las lagunas.

Las concentraciones de la fracción disuelta y total de Selenio, en las muestras de agua superficial, agua subterránea y manantiales, estuvieron por encima de los ECA Cat. 4-E1 y 4-E2 (0,005 mg/L) encontrándose excedencias de hasta ocho veces el valor de este criterio ambiental; asimismo, se presentaron excedencias a los ECA Cat. 3-D1 (0,02 mg/L) en la laguna Delicias, manantial Miramar y Piezómetro 25 de hasta dos veces este criterio ambiental. Las concentraciones de Selenio Disuelto y Total en el humedal costero Pantanos de Villa fueron más altas durante época húmeda (julio-agosto 2022), como se aprecia en la Fig. 5g y 5h. Es importante precisar que el Selenio es una sustancia que se bioacumula en un mayor grado en cuerpos de agua lenticos y que tiene efectos nocivos sobre la capacidad de reproducción de las aves, principalmente las que viven en ambientes acuáticos [55]. Las concentraciones de Selenio encontradas en los cuerpos de agua superficial del humedal costero Pantanos de Villa incrementan la probabilidad de encontrar concentraciones tóxicas (0,02 mg/g) [55], [56] en los huevos del pato cabeza verde *Anas platyrhynchos* que ha sido introducido en el humedal costero [57]. Entre las probables fuentes de origen natural de Selenio presentes en el humedal costero Pantanos de Villa se tiene a la presencia de sedimentos y aerosoles de origen marino [55]. Entre probables fuentes de origen antropogénico se tiene a la descarga de aguas residuales domésticas sin tratamiento y a la disposición inadecuada de residuos sólidos [55].

Adicionalmente, los resultados por INGEMMET (2018), encontraron concentraciones de Talio Total por encima de los ECA Cat. 4-E1 y 4-E2 (0,0008 mg/L, en ambas categorías) en todas las estaciones que evaluaron; mientras que, en el presente estudio, 2022, este parámetro fue encontrado por debajo del límite de cuantificación (<0,0006 mg/L) en todas las estaciones de muestreo. Por otro lado, en los

resultados por INGEMMET [7], se encontró un valor puntual (0,029 mg/L) de Mercurio Total por encima de los ECA Cat. 4-E2 (0,0001 mg/L), Cat. 3-D1 (0,001 mg/L) y Cat. 3-D2 (0,01 mg/L) en el Manantial Miramar; sin embargo, las concentraciones de Mercurio Disuelto y Total en el humedal costero Pantanos de Villa, muestreados en el 2022 como parte del presente estudio, se mantuvieron por debajo del Límite de Detección y/o Cuantificación (<0,00003 mg/L y <0,00015 mg/L, respectivamente). A pesar de que las excedencias de Mercurio y Talio no se registraron en el presente estudio, se ha encontrado una mayor cantidad de parámetros que excedían a los ECA respecto al estudio realizado por INGEMMET en enero 2018 [7].

En el Anexo A y B se muestra los resultados de calidad de agua en las aguas superficiales y subterráneas del humedal costero Pantanos de Villa (época seca y húmeda).

CONCLUSIONES

Se han registrado 19 parámetros que exceden a los ECA para agua del D.S. N° 004-2017-MINAM en el humedal costero Pantanos de Villa considerando las categorías 3 y 4 durante las campañas de muestreo realizadas en el año 2022, los cuales ponen en riesgo la sostenibilidad del ecosistema y los objetivos de conservación como área natural protegida. Entre estos parámetros se encuentran el Selenio y el Boro que están ampliamente distribuidos en el humedal costero Pantanos de Villa en concentraciones que superan hasta en once veces a los ECA para agua, es importante precisar que ambos metales se bioacumulan, son persistentes y afectan a los organismos acuáticos representativos del humedal costero como el carricito *Phragmites australis* y las aves migratorias. Por otro lado, se ha registrado un incremento en las concentraciones de ambos parámetros respecto a los registrados por INGEMMET [7], por lo que, la calidad de agua en el humedal costero Pantanos de Villa se ha deteriorado entre el año 2018 y 2022.

La calidad de agua en el humedal costero Pantanos de Villa no es uniforme respecto al tipo de matriz evaluada (agua superficial, agua subterránea o manantiales), siendo las muestras de agua subterránea las que presentaron una mayor cantidad de parámetros que exceden a los ECA para agua, es importante precisar que el agua subterránea es la principal fuente de recarga de las lagunas del humedal costero Pantanos de Villa. Mientras que, los manantiales del humedal costero presentaron la menor cantidad de parámetros que superaron los ECA; sin embargo, se ha encontrado concentraciones de metales como el Boro y Selenio en

concentraciones peligrosas para el ecosistema acuático en las campañas de muestreo 2022. En el caso de las aguas superficiales, la laguna Delicias ha presentado una mayor cantidad de parámetros que exceden los ECA en una proporción que alcanza las concentraciones tóxicas para especies acuáticas identificadas en el humedal costero como *Ceriodaphnia dubia*, *Phragmites australis* y *Anas platyrhynchos*.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen por el financiamiento al Proyecto de Investigación Formativa N° FIQT-PF-32-2021 del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería; a la Autoridad Municipal de los Pantanos de Villa (Prohvilla) y al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) por proporcionar los medios necesarios para el ingreso al humedal costero Pantanos de Villa y proporcionar las facilidades para realizar las campañas de muestreo según R.J. N° 01-2021-SERNANP-JEF y R.J. N° 002-2022-SERNANP-JEF.

REFERENCIAS

- [1] Municipalidad Metropolitana de Lima. (29, jul. 2020). Ordenanza N° 2264, Ordenanza sobre la Zona de Reglamentación Especial de los Pantanos de Villa (ZRE PV). [En línea]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/pantanosdevilla/normas-legales/4783274-2264-mml>
- [2] Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) e Instituto Metropolitano de Planificación (IMP), "Evaluación, ordenación y plan de manejo para el desarrollo integral de los Pantanos de Villa: geológico, geomorfológico, hidrológico e hidrogeológico", nov. 1991. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3395>
- [3] L. Arana Tejada, "Refugio de Vida Silvestre los Pantanos de Villa como socioecosistema desde una metodología socioecológica", *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, vol. 25, no. 49, pp. 313-319, jun. 2022. doi: 10.15381/iigeo.v25i49.21446
- [4] Instituto Nacional de Recursos Hídricos – INRENA, "Ficha Técnica – Zona Reservado Los Pantanos de Villa", Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Lima, Perú, dic. 1996. [En línea]. Disponible: https://rsis Ramsar.org/RISapp/files/RISrep/PE884RISformer_160210.pdf
- [5] A. H. Sánchez Sánchez, "Restauración de los canales eutrofizados de abastecimiento de agua a los Pantanos de Villa", Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/17439>
- [6] V. M. Pulido Capurro y L. Bermúdez Díaz, "Estado Actual de la Conservación de los hábitats de los Pantanos de Villa, Lima, Perú", *Arnaldoa*, vol. 25, no. 2, pp. 679-702, ago. 2018. doi: 10.22497/arnaldoa.252.25219
- [7] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), "Estudio Hidrogeológico del Refugio de Vida Silvestre Los Pantanos de Villa, Chorrillos – Lima", INGEMMET, Lima, Perú, Informe Técnico no. A6873, mar. 2019. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2241?locale=es>
- [8] Autoridad Municipal de los Pantanos de Villa (Prohvilla), "Plan de Vigilancia y Control de la Zona de Reglamentación Especial de los Pantanos de Villa (ZRE PV)", Prohvilla, 2023. [En línea].

Disponible:

- <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5006370/PLAN%20DE%20VIGILANCIA%20Y%20CONTROL%202023.pdf>
- [9] K. Salazar Navarro, A. D. Olortegui Tello, H. Aponte y T. Lobato-de Magalhães, “Wetland Science in Latin America and the Caribbean Regio: Insights into the Andean States”, *Wetland Science & Practice*, vol. 37, no. 4, oct. 2020. [En línea]. Disponible: <https://members.sws.org/wetland-science-and-practice/Details/october-2020-wetland-science-practice-46859>
- [10] R. C. Barrientos-Medina, R. Ceballos-Povedano, V. M. Cobos-Gasca y J. A. Navarro-Alberto, “Calidad de Agua en Humedales Urbanos de Isla Mujeres, Quintana Roo, México”, *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 24, no.1, 2021. doi: 10.56369/tsaes.3648
- [11] R. Figueroa, M. L. Suarez, A. Andreu, V. H. Ruiz y M. R. Vidal-Abarca, “Caracterización Ecológica de Humedales de la Zona Semiárida en Chile Central”, *Gayana (Concepción)*, vol. 73, no. 1, pp. 76-94, 2009. doi: 10.4067/S0717-65382009000100011
- [12] H. Canales Cuadros, C. Cabrera Carranza y J. Arana Maestre, “Macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua en el Área de Conservación Regional Humedales de Ventanilla, Callao”, *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, vol. 25, no. 49, pp. 295-301, jun. 2022. doi: 10.15381/iigeo.v25i49.23013
- [13] Ministerio del Ambiente. (07, jun. 2017). Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. [En línea]. Disponible: <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- [14] C. A. Córdova Tello, A. A. Huamantico-Araujo, “Efecto de las Variables Físicoquímicas en la Comunidad de Coleópteros Acuáticos en un Humedal Costero, Lima, Perú”, *Acta Biológica Colombiana*, vol. 28, no. 2, pp. 204-219, 2023. doi: 10.15446/abc.v28n2.99534
- [15] C. C. Alvarez Gutierrez, “Determinación Analítica de Detergentes en las Aguas de los Pantanos de Villa”, Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2016. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7570>
- [16] Ministerio del Ambiente. (19, dic. 2015). Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación. [En línea]. Disponible: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-N%C2%Bo-015-2015-MINAM.pdf>
- [17] S. Huaman-Vilca, M. Lucen-Espinoza, M. Paredes-Vite y D. Changanaqui Alfaro, “Evaluación de la calidad del agua de la laguna Marvilla en los Pantanos de Villa (Lima, Perú)”, *South Sustainability*, vol. 1, no. 2, 2021. doi: 10.21142/SS-0102-2020-019
- [18] E. M. Enrique-Ayala, C. R. Gavidia Adriano, A. M. Garriazo Suni y D. Changanaqui Alfaro, “Evaluación de la calidad del agua en los canales de la Zona de Reglamentación Especial de Los Pantanos de Villa (Lima, Perú)”, *South Sustainability*, vol. 2, no 2, 2021. doi: 10.21142/SS-0202-2021-e002
- [19] Autoridad Nacional del Agua. (22, feb. 2018). Resolución Jefatural N° 068-2018-ANA, Aprueban Metodología para la determinación del índice de calidad de agua ICA-PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales. [En línea]. Disponible: <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/metodologia-para-la-determinacion-del-indice-de-calidad-de-agua-ica-pe-aplicado-los>
- [20] Autoridad Nacional del Agua. (29, abr. 2016). Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA, Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. [En línea]. Disponible: <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/protocolo-nacional-para-el-monitoreo-de-la-calidad-de-los-recursos-hidricos-o>
- [21] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), *Manual de Buenas Prácticas en la Investigación de Sitios Contaminados Muestreo de Aguas Subterráneas*, Perú: Ministerio del Ambiente, 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2628-manual-de-buenas-practicas-en-la-investigacion-de-sitios-contaminados-muestreo-de-aguas-subterraneas>
- [investigacion-de-sitios-contaminados-muestreo-de-aguas-subterraneas](https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2628-manual-de-buenas-practicas-en-la-investigacion-de-sitios-contaminados-muestreo-de-aguas-subterraneas)
- [22] D. K. Mueller, T. L. Schert, J. D. Martin y M. W. Sandstrom, *Desing, Analysis, and Interpretation of Field Quality-Control Data for Water-Sampling Projects*. Estados Unidos: U.S. Geological Survey, 2015. doi: 10.3133/tm4C4
- [23] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), *Protocols Manual for Water Quality Sampling in Canada*, Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2011. [En línea]. Disponible: https://publications.gc.ca/collections/collection_2013/ccme/En108-4-62-2011-eng.pdf
- [24] P. Mitchell, *Guidelines for Quality Assurance and Quality Control in Surface Water Quality Programs in Alberta*. Canada: Alberta Environment, 2006. [En línea]. Disponible: <https://open.alberta.ca/dataset/0778550826>
- [25] R. A. Freeze, J. A. Cherry, *Groundwater*. Estados Unidos: Prentice-Hall, Inc. 1979. [En línea]. Disponible: <https://gw-project.org/books/groundwater/>
- [26] D. K. Nordstrom, R. B. McCleskey, J. W. Ball, “Sulfur Geochemistry of Hydrothermal Water in Yellowstone National Park: IV Acid-Sulfate Water”, *Applied Geochemistry*, vol. 2, no. 2, pp. 191-207, abr. 2009. doi: 10.1016/j.apgeochem.2008.11.019
- [27] United States Environmental Protection Agency (US EPA), “Metals Parameter Factsheet”, US EPA, EPA 841F21007J, ene. 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.epa.gov/awma/metals-parameter-factsheet>
- [28] Ministerio del Ambiente. (13, oct. 2005). Ley N° 28611, Ley General del Ambiente. [En línea]. Disponible: https://www.oefa.gob.pe/wp-content/uploads/2012/07/MJ003_L28611_-_Ley_General_del_Ambiente.pdf
- [29] Autoridad Nacional del Agua. (13, feb. 2018). R.J. N° 056-2018-ANA, Aprobar la Clasificación de Cuerpos de Agua Continentales Superficiales. [En línea]. Disponible: <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/clasificacion-de-los-cuerpos-de-agua-continentales-superficiales>
- [30] Autoridad Nacional del Agua. (24, feb. 2021). R.D. N° 186-2021-ANA-AAA-Cañete-Fortaleza, Licencia de Uso de Agua con Fines Recreativos a favor del Country Club Villa.
- [31] J. D. Rhoades, A. Kandiah y A. M. Mashali, *The use of saline waters for crop production*, Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1992. [En línea]. Disponible: <https://www.fao.org/4/To667E/To667E00.htm>
- [32] Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA). Vigilancia y Monitoreo de los Recursos Hídricos – Pantanos de Villa 2005. Accedido: 19 feb. 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/vigilancia_recursos_hidricos.asp
- [33] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Causal Analysis/Diagnosis Decision Information System (CADDIS): pH. Accedido: 08 feb. 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.epa.gov/caddis-vol2/ph>
- [34] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), *Guidance on the Site-Specific Application of Water Quality Guidelines in Canada: Procedures for Deriving Numerical Water Quality Objectives*, 2003. [En línea]. Disponible: <https://ccme.ca/en/res/guidance-on-the-site-specific-application-of-water-quality-guidelines-in-canada-en.pdf>
- [35] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Causal Analysis/Diagnosis Decision Information System (CADDIS): dissolved oxygen. Accedido: 08 feb. 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.epa.gov/caddis-vol2/dissolved-oxygen>
- [36] Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA). Vigilancia y Monitoreo de los Recursos Hídricos – Pantanos de Villa 2006. [En línea]. Disponible: http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/vigilancia_recursos_hidricos.asp
- [37] A. Chacón y A. D. Pajuelo, “Factores Geológicos en los humedales de Villa – Chorrillos”. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Minas Metalurgia y Ciencias*

Geográficas, vol. 13, no. 26, dic. 2010. [En línea]. Disponible: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/426>

[38] SGS del Perú S.A, *Estudio de impacto ambiental definitivo Lucchetti Perú S.A.* 1997. [En línea]. Disponible:

<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2718>

[39] United States Environmental Protection Agency (US EPA). *Causal Analysis/Diagnosis Decision Information System (CADDIS): Ionic Strength.* [En línea]. Disponible:

<https://www.epa.gov/caddis-vol2/ionic-strength>

[40] R. S. Ayers y D. W. Westcot, *Water Quality for Agriculture*, Rome, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1985. [En línea]. Disponible:

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/012596a1-df82-45c5-b488-ae130a4f918b/content>

[41] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), *Scientific Criteria Document for the Development of the Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life Chloride Ion*, 2011. [En línea]. Disponible:

<https://ccme.ca/fr/res/2011-chloride-ceqg-scd-1460-en.pdf>

[42] Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA). *Estándares de Calidad Ambiental de Agua Grupo N° 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales.* Consultado: 09 feb. 2024. [En línea]. Disponible:

http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUP_O%20DE%20USO%203.pdf

[43] J. Iannacone y L. Alvaríño, “Diversidad y Abundancia de Comunidades Zooplanctónicas Litorales del Humedal Pantanos de Villa, Lima, Perú”, *Gayana*, vol. 71, no. 1, pp. 49-65, 2007. doi: 10.4067/S0717-65382007000100006

[44] C. Meays y R. Nordin, *Ambient Water Guidelines for Sulphate Technical Appendix.* Canada: Ministry of Environment Province of British Columbia, 2013. [En línea]. Disponible:

https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/waterquality/water-quality-guidelines/approved-wqgs/sulphate/bc_moe_wqg_sulphate.pdf

[45] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic: Nitrate*, 2012. [En línea]. Disponible:

<https://ccme.ca/en/res/nitrate-ion-en-canadian-water-quality-guidelines-for-the-protection-of-aquatic-life.pdf>

[46] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Boron*, 2009. [En línea]. Disponible:

<https://ccme.ca/en/res/boron-en-canadian-water-quality-guidelines-for-the-protection-of-aquatic-life.pdf>

[47] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), *Scientific Criteria Document for the Development of the Canadian Water Quality Guidelines for Boron*, 2009. [En línea]. Disponible:

<https://ccme.ca/en/res/2009-boron-cwqg-scd-1437-en.pdf>

[48] W. Bergmann, P. Bruchlos y G. Marks, “The toxic limiting value of boron”, *Tenside Surfactants Detergents*, vol. 32, no. 3, pp. 229-237, 1995. doi: 10.1515/tsd-1995-320306

[49] B. León, A. Cano y K. R. Young, “La Flora Vasculosa de los Pantanos de Villa, Lima Perú: Adiciones y Guía para las Especies Comunes”, *Publicaciones del Museo de Historia Natural Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, vol. 38, no. 38, pp. 1-39, 1995.

[50] D. M. Ramirez y A. Cano, “Estado de la Diversidad de la Flora Vasculosa de los Pantanos de Villa (Lima-Perú)”, *Revista Peruana de Biología*, vol. 17, no. 1, 2010. doi: 10.15381/rpb.v17i1.58

[51] D. W. Ramirez, H. Aponte, G. Lertora y F. Gil, “Incendios en el humedal Ramsar Los Pantanos de Villa (Lima-Perú): Avances en su conocimiento y perspectivas futuras”, *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 20, no. 3, 2018. doi: 10.18271/ria.2018.398

[52] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), *Scientific Criteria Document for the Development of the Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life Manganese*, 2019. [En línea]. Disponible:

<https://www.ccme.ca/en/res/2019-manganese-cwqg-scd-1601-en.pdf>

[53] J. Li, Y. Jia, R. Dong, R. Huang, P. Liu, X. Li, Z. Wang, G. Liou y Z. Chen, “Advances in the Mechanisms of Plant Tolerance to Manganese Toxicity”, *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no.20, 2019. doi: 10.3390/ijms20205096

[54] B.C. Ministry of Environment and Climate Change Strategy, *Lead Water Quality Guidelines (reformatted from: British Columbia Ministry of Environments and Parks, 1987. Water quality criteria for lead)*, 2021.

[55] Ministry of Environment Province of British Columbia, *Ambient Water Quality Guidelines for Selenium Technical Report Update*, 2014. [En línea]. Disponible:

https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/waterquality/water-quality-guidelines/approved-wqgs/bc_moe_se_wqg.pdf

[56] W. J. Adams, K. V. Brix, K. A. Cothorn, L. M. Tear, R. D. Carwell, A. Fairbrother y J. E. Toll, “Assessment of Selenium Food Chain Transfer and Critical Exposure Factors for Avian Wildlife Species: Need for Site- Specific Data”, *Environmental Toxicology and Risk Assessment: Seventh Volume*, 1998, pp. 312-342. [En línea]. Disponible: <https://www.osti.gov/biblio/320959>

[57] V. Pulido, “Ciento quince años de registros de aves en Pantanos de Villa”, *Revista Peruana de Biología*, vol. 25, no.3, 2018. doi: 10.15381/rpb.v25i3.15212



Los artículos publicados por la TECNIA se distribuyen bajo la licencia de uso Creative Commons (CC BY 4.0). Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo tecnia@uni.edu.pe

ANEXOS