

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL HUMEDAL URBANO LUIS EBEL MEDIANTE MONITOREO DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

EVALUATION OF WATER QUALITY IN THE LUIS EBEL URBAN WETLAND THROUGH PHYSICOCHEMICAL PARAMETER MONITORING

Terre F.¹, León C.A.², Leiva-González J.*^{1,3}

RESUMEN

El estudio realizado en el humedal urbano Luis Ebel, ubicado en Puerto Montt, Chile, evaluó la calidad del agua mediante el monitoreo de parámetros fisicoquímicos clave, siguiendo normativas ambientales. Este ecosistema, de gran relevancia ecológica, enfrenta presiones derivadas de actividades humanas, lo que resalta la necesidad de estrategias de conservación y manejo sostenible. Se realizaron mediciones *in situ* de parámetros como oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica, complementadas con análisis de laboratorio para determinar fósforo, nitratos, nitritos y Demanda Química de Oxígeno (DQO). La investigación propuso un Índice de Calidad de Agua (ICA), que clasifica los parámetros en dos grupos: parámetros generales (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y DQO), que ofrecen información básica sobre la calidad del agua y son monitoreados regularmente por la Dirección General de Aguas (DGA) en Chile, y parámetros complementarios (nitratos, nitritos y fósforo), asociados al proceso de eutrofización. Los resultados indicaron que la calidad del agua varía entre "regular" y "buena" según el ICA propuesto. Se destacaron concentraciones elevadas de fósforo en algunos puntos, posiblemente por fuentes antrópicas, mientras que indicadores como oxígeno disuelto y conductividad eléctrica reflejaron condiciones favorables. Este estudio subraya la utilidad del ICA como herramienta para sintetizar información sobre la calidad del agua y facilitar su monitoreo continuo. Además, resalta la importancia de implementar estrategias de manejo adaptativo que reduzcan fuentes de contaminación y protejan la biodiversidad del humedal.

Palabras clave: humedal urbano, calidad de agua, parámetros fisicoquímicos, índice calidad de agua (ICA), eutrofización.

ABSTRACT

The study was conducted in the Luis Ebel urban wetland, located in Puerto Montt, Chile, and assessed water quality by monitoring key physicochemical parameters, following environmental regulations. This ecosystem, of significant ecological importance, faces pressures from human activities, highlighting the need for conservation and sustainable management strategies. *In situ* measurements were carried out for parameters such as dissolved oxygen, pH, and electrical conductivity, complemented by laboratory analyses to determine phosphorus, nitrates, nitrites, and Chemical Oxygen Demand (COD). The research proposed a Water Quality Index (WQI), which classifies parameters into two groups: general parameters (pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, and COD), which provide basic information about water quality and are regularly monitored by Chile's General Water Directorate (DGA), and complementary parameters (nitrates, nitrites, and phosphorus) associated with the eutrophication process. The results indicated that water quality ranges between "regular" and "good" according to the proposed WQI. Elevated phosphorus concentrations in some areas, likely from anthropogenic sources, were noted, while indicators such as dissolved oxygen and electrical conductivity reflected favorable conditions. This study highlights the usefulness of the WQI as a tool to synthesize water quality information and facilitate continuous monitoring. Additionally, it emphasizes the importance of implementing adaptive management strategies to reduce pollution sources and protect the wetland's biodiversity.

Key Word: urban wetland, water quality, physicochemical parameters, Water Quality Index (WQI), eutrophication.

¹ Escuela de Ingeniería Civil y Ciencias Geoespaciales, Facultad de Ingeniería, Ciencia y Tecnología, Universidad Bernardo O'Higgins, Santiago 8370993, Chile.

² Centro de Investigación en Recursos Naturales y Sustentabilidad (CIRENYS), Facultad de Ciencias Médicas, Universidad Bernardo O'Higgins, Santiago, Chile.

³ Departamento de Formación y Desarrollo Científico en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Ciencia y Tecnología, Universidad Bernardo O'Higgins, Santiago

* Autor correspondiente: Jorge Leiva González (jorge.leiva@ubo.cl)

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales son ecosistemas hídricos los cuales constan de superficies terrestres cubiertas de agua. Se encuentran donde el nivel freático está cercano a la superficie del suelo y cubren entre el 4 y 6% de la superficie terrestre (Mitsch & Gosselink, 2015). Además, los humedales tienen una composición y estructura ecológica altamente complejas, y son considerados como una unidad funcional en el planeta, lo cual genera desafíos para su conservación y manejo sostenible (Prigent et al., 2012).

Los humedales son ecosistemas de alta variedad y son de gran importancia para la conservación, esta importancia radica en que, por una parte, son sistemas altamente productivos para el desarrollo humano y por otra parte, son una fuente importante de diversidad biológica. Como instrumento de valorización de los beneficios que otorgan los sistemas naturales y sus componentes, surgen los servicios ecosistémicos (SSEE). También se consideran un componente importante de la sostenibilidad, influyendo en la relación del humano con la naturaleza y en la integración de componentes económicos y sociales (Prigent et al., 2012).

En general, las investigaciones indican que los humedales representan aproximadamente el 40,6% del valor total de los servicios ecosistémicos a nivel mundial (Convención de Ramsar sobre los Humedales, 2018; Costanza et al., 2014). Entre los beneficios y servicios ecosistémicos que otorgan específicamente los humedales se encuentra la provisión de agua dulce, tratándose de humedales continentales, pesca como fuente de alimentos de comunidades, purificación del agua y detoxificación de desechos asociados a los pantanos. Adicionalmente, uno de los servicios ecosistémicos más importantes que otorgan los humedales es la regulación del cambio climático global, debido a que funcionan como captadores de carbono, también funcionan como amortiguadores físicos de los impactos generados por el cambio climático, como las subidas de la marea, salinización de reservas de agua dulce, entre otros efectos. (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Los humedales y sus cuencas aportantes enfrentan una variedad de amenazas que incluyen la contaminación de las aguas, la presión ejercida por actividades agrícolas y acuícolas, el crecimiento demográfico, el aumento en la demanda de agua dulce, la aparición de enfermedades emergentes, los cambios

en los regímenes hidrológicos, y el incremento de las temperaturas (Herbert et al., 2015; Kingsford et al., 2016; Rodríguez-Jorquera et al., 2020; Aguilar et al., 2010). Estas amenazas generan alteraciones significativas, muchas de las cuales resultan en cambios irreversibles en la estructura y dinámica natural de los ecosistemas de humedales.

Entre los factores más críticos que desencadenan estas alteraciones se encuentran la localización de asentamientos humanos en áreas de influencia de los humedales, la extracción y modificación de los caudales de agua superficial, la quema de vegetación riparia, la extracción no regulada de aguas subterráneas y la alteración de los cauces naturales. Estas intervenciones transforman de manera drástica el funcionamiento de los humedales, comprometiendo su capacidad para proveer servicios ecosistémicos clave y amenazando su sostenibilidad a largo plazo.

Entre los ecosistemas de humedales, la legislación chilena, mediante la Ley 21.202, 2020, reconoce a los humedales urbanos como aquellos que cumplen con la definición establecida por la Convención Ramsar, siempre que se encuentren total o parcialmente dentro del límite urbano. Estos ecosistemas desempeñan un papel crucial debido a los servicios ecosistémicos (SSEE) que ofrecen y a su alta vulnerabilidad frente a múltiples amenazas de origen antrópico.

En este contexto, la Ley 21.202 enfatiza la necesidad de monitorear variables e indicadores del medio biofísico ambiental como una herramienta clave para implementar planes de gestión y monitoreo adaptativos. Estas acciones buscan garantizar la conservación y gestión adecuada de los humedales urbanos, permitiendo identificar y mitigar amenazas potenciales, así como proteger sus características ecológicas y su régimen hidrológico.

El presente estudio busca evaluar la calidad del agua del humedal Luis Ebel en la ciudad de Puerto Montt, Chile. Para ello, se realizó un monitoreo de parámetros fisicoquímicos en base a la normativa nacional vigente. Posteriormente, al analizar las muestras tomadas en terreno y obtener los resultados según las metodologías

recomendadas por la guía de monitoreo de humedales del Ministerio del Medio Ambiente (MMA-ONU Medio Ambiente, 2022) y se evaluó la calidad del agua del humedal mediante un Índice de Calidad de Aguas que se propone para sintetizar los parámetros medidos. El objetivo es dar una primera aproximación que permita proponer un plan de monitoreo continuo para conservar las características ecológicas del humedal. Se espera que los resultados ayuden a identificar posibles amenazas y diseñar estrategias de gestión ambiental que aseguren la sostenibilidad a largo plazo del humedal.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio.

El humedal urbano Luis Ebel está ubicado en la ciudad de Puerto Montt, Región de Los Lagos, reconocido en el catastro de humedales urbanos con el código HU-0098, cuya declaratoria consta en la Resolución Exenta N° 84/ 2023 (MMA, 2024). Es una laguna continental de 5,28 ha. En este contexto, en este estudio se recolectaron muestras desde 6 puntos georreferenciados en función de obtener información representativa del cuerpo de agua (Figura 1).

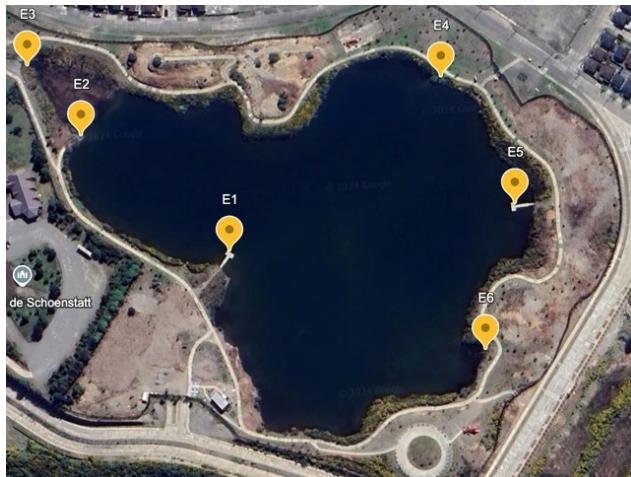


Figura 1. Puntos de análisis del cuerpo de agua. Fotografía satelital extraída de Google Earth. Puntos marcados en amarillo y numerados E1-E6 identifican los sitios de muestreo. *Elaboración propia.*

Las mediciones fueron realizadas el día 11 de enero del año 2024, en época de verano. Primero, se realizaron mediciones *in situ* de parámetros fisicoquímicos con equipo multiparamétrico HI9829 Hanna Instruments. Luego, se recolectaron muestras de agua (300 ml por punto) de las cuales se filtraron

150 ml con filtros de 0,45 µm para análisis en laboratorio, mientras que las muestras sin filtrar se obtuvieron directamente del cuerpo de agua en cada punto. En terreno se recolectaron un total de 24 muestras de agua, divididas en 12 muestras sin filtrar y 12 muestras filtradas. Para cada punto de muestreo (E1-E6), se tomaron 2 muestras sin filtrar y 2 muestras filtradas, asegurando representatividad para el análisis en laboratorio y la evaluación de los parámetros fisicoquímicos. Los análisis de laboratorio incluyeron la medición de DQO (Demanda Química de Oxígeno), nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-) y fósforo siguiendo métodos estandarizados según: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Rice et al., 2012). La Figura 2 presenta un esquema del procedimiento experimental realizado, el cual se divide en parámetros *in-situ* y parámetros fisicoquímicos que se asocian a las muestras analizadas en laboratorio.

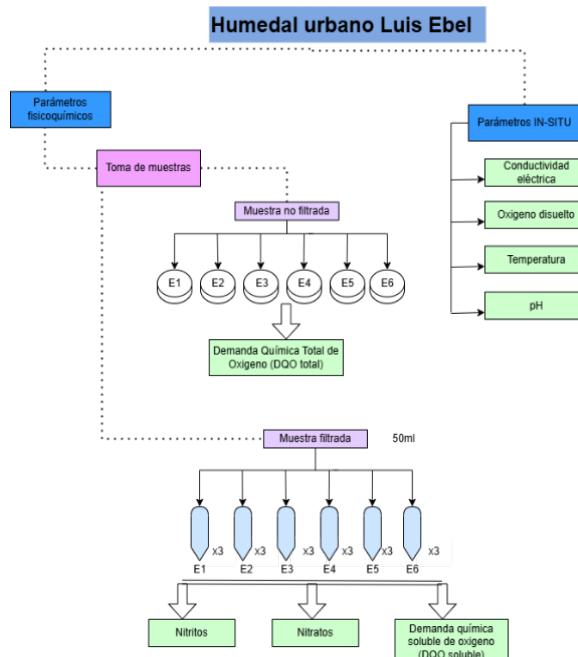


Figura 2. Plan de mediciones y toma de muestras en terreno. *Elaboración propia.*

2.2. Parámetros analizados.

Con el fin de sintetizar los parámetros analizados para evaluar la calidad del agua se desarrolló un índice de calidad de aguas superficiales siguiendo criterios establecidos por el programa

Escenario Hídricos 2030 de la Fundación Chile (Girardi et al., 2018).

En el estudio se consideraron cuatro parámetros generales que proporcionan información básica sobre la calidad del agua y son medidos en todas las estaciones en línea de la Dirección General de Aguas (DGA). Además, se incluyeron parámetros complementarios específicos, los cuales se relacionan con el proceso de eutrofización, que corresponden a nitrógeno y fósforo (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2004). A continuación, se describen los parámetros generales evaluados:

- **Conductividad eléctrica (CE):** Indica la capacidad del agua para conducir electricidad, lo que está relacionado con la concentración de electrolitos presentes en la solución acuosa.
- **Oxígeno disuelto (OD):** Es un indicador clave en la descomposición de compuestos orgánicos en el suelo y el agua del humedal. Su concentración está influenciada por la temperatura y, junto con otros indicadores de nutrientes, puede señalar procesos de eutrofización.
- **Demandा química de oxígeno (DQO):** Parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerida para oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua.
- **pH:** Valores menores a 7 indican condiciones ácidas, mientras que valores mayores a 7 reflejan condiciones alcalinas. Factores como el aporte de aguas lluvias, flujos superficiales y escorrentías urbanas pueden afectar el pH del agua.

Para el caso del nitrito y nitrato, indicadores claves para estudiar posible eutrofización en el humedal, se utilizó la metodología según Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Rice et al., 2012). En este contexto, los nitritos fueron analizados según el método colorimétrico “4500-NO₂⁻ Colorimetric Method” y los nitratos según el método de detección espectrofotométrica ultravioleta “4500-NO₃⁻ B. Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method” (Rice et al., 2012).

2.3. Evaluación de calidad ambiental.

Normalización de resultados: Con el objetivo de obtener resultados comparables, Girardi et al. (2018) proponen una tabla de normalización para cada parámetro evaluado, ajustada según sus unidades de

medida. Este proceso permite integrar los datos en una escala estandarizada de 1 a 4, facilitando el cálculo del índice de calidad ambiental (Girardi et al., 2018). Esta metodología fue utilizada para evaluar la calidad ambiental del humedal. Para establecer los rangos de los parámetros se utilizaron como referencia para pH, OD, CE, Nitritos y Nitratos lo indicado en la Metodología de Construcción de Índice de Calidad para aguas superficiales elaborada por Girardi et al. (2018). Para el pH existen dos rangos uno inferior y otro superior (Tabla 1). En el caso de la DQO, si bien se utilizaron los rangos establecidos por esta guía, el valor máximo considerado fue el indicado en el Decreto 122/2010, el cual corresponde a la normativa secundaria de calidad ambiental en el Lago Llanquihue. Este cambio se realizó, debido a que la concentración máxima permitida era menor y por las características se adapta más al humedal estudiado. Para el fósforo, el rango establecido se basó en lo indicado por las Directrices canadienses sobre la calidad del agua para la protección de la vida acuática (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2004).

Tabla 1. Normalización de resultados de parámetros. *Elaboración propia.*

<i>Qi</i>	1	2	3	4
pH	6,5 ≤ pH ≤ 8,2	6,0 ≤ pH < 6,5	5,5 ≤ pH ≤ 6,0	< 5,5
		8,2 < pH ≤ 9,0	9,0 ≤ pH ≤ 9,5	> 9,5
OD mg/l	> 7,5	5,5 < OD ≤ 7,5	5,0 < OD ≤ 5,5	< 5,0
CE μS/cm	< 600	750	1500	2250
DQO mg O₂/l	≤ 6	10 < DQO ≤ 20	20 < DQO < 40	≥ 40
NO₂⁻ mg/l	≤ 0,05	< 0,06	< 0,06	< 0,0
NO₃⁻ mg/l	≤ 13	13	50	≥ 50
Fósforo total mg/l	≤ 0,01	0,01 < P ≤ 0,035	0,035 < P ≤ 0,15	0,15 < P ≤ 80

El índice de calidad de agua (ICA), el cual será calculado para cada punto de medición, se define mediante la siguiente ecuación:

$$ICA = W_{pg} \cdot \max(Q_{i,pg}) + W_{pc} \cdot \max(Q_{i,pc})$$

Dónde:

- W_{pg} es el peso asignado a los parámetros generales. ($W_{pg} = 0.49$)
- W_{pc} es el peso asignado a los parámetros complementarios. ($W_{pc} = 0.51$)
- $\max(Q_i)$ máximo valor normalizado de los parámetros o generales ($Q_{i,pg}$) o complementarios ($Q_{i,pc}$).

El índice utilizado clasifica la calidad del agua en cuatro niveles, definidos en función de los resultados obtenidos a partir del cálculo previamente descrito.



Figura 3. Niveles de Calidad de aguas según Índice utilizado. *Modificado de Girardi et al. (2018).*

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Con base en los parámetros analizados y las metodologías previamente definidas, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales permiten evaluar la

calidad del agua y analizar las condiciones ambientales de los puntos de muestreo seleccionados.

3.1. Evaluación calidad ambiental humedal.

La tabla 3 presenta los resultados de los análisis realizados en laboratorio con sus respectivas desviaciones estándar.

Tabla 3 Resultados de parámetros medidos en laboratorio y sus desviaciones estándar. *Elaboración propia.*

Muestra	DQO	Nitrito s	Nitratos	Fósforo
E-1	6,74 ± 0,9	0,000 ± 0,000 1	0,00435 ± 0,0003	0,1 ± 0,0014
E-2	3,86 5 ± 0,16	0,000 0,000 1	0,0015 ± 0,0002	0,09 ± 0,0085
E-3	4,5 ± 0,42	0,000 ± 0,000 1	0,00335 ± 0,0002	0,09 ± 0,0028
E-4	5,65 5 ± 0,43	0,000 0,000 0	0,00215 ± 0,0001	0,08 ± 0,0064
E-5	9,21 ± 0,27	0,000 0,000 0	0,0029 ± 0,0004	0,07 ± 0,0057
E-6	11,0 4 ± 0,47	0,000 0,000 1	0,0014 ± 0,0002	0,03 ± 0,0021

En relación con la concentración de nitritos, los resultados muestran un valor de 0 mg/L en todos los puntos evaluados (E1 a E6). Este hallazgo sugiere la ausencia de oxidación parcial del nitrógeno en las muestras analizadas, lo que podría indicar que no existen procesos significativos de contaminación reciente por compuestos nitrogenados o que las condiciones del agua son favorables para la oxidación completa hacia nitratos.

El comportamiento de los parámetros medidos se presenta en las Figuras 3-5. En particular, en la Figura 3 se observa que las concentraciones de nitratos son consistentes en todos los puntos evaluados, con un promedio de 0,0023 mg NO₃⁻/L. Estos niveles bajos de nitratos indican condiciones de mínima contaminación nitrogenada, lo que sugiere la presencia de procesos naturales de remoción altamente eficientes o bajas concentraciones de nitrógeno en general (Villagrán-Mella et al., 2006). Este comportamiento es comparable a los resultados reportados en estudios de humedales urbanos en Concepción, Chile, donde áreas con baja presión antrópica presentan concentraciones similares de nitratos. Esto se ha atribuido principalmente a procesos de desnitrificación en los sedimentos y a la asimilación de nitratos por la vegetación acuática, mecanismos que desempeñan un papel clave en la regulación natural de nutrientes en estos ecosistemas (Villagrán-Mella et al., 2006).

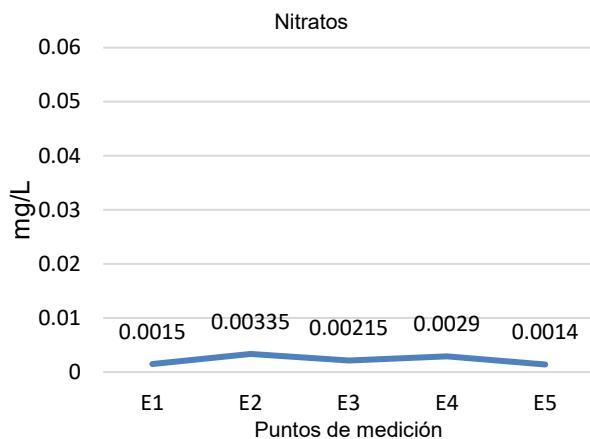


Figura 4. Concentración de NO₃⁻ para puntos de medición (E1-E6). *Elaboración propia.*

Respecto a las variables de pH (Figura 5) y oxígeno disuelto (Figura 6), no se observa una variabilidad significativa entre los puntos analizados. El pH promedio, cercano a 6,6, indica un sistema acuático ligeramente ácido, pero dentro del rango neutro, característico de humedales con buena calidad de agua y procesos biológicos activos como la desnitrificación y la fotosíntesis. Califica dentro del rango de la mayoría de las aguas naturales aptas para la vida acuática (MMA-ONU Medio Ambiente, 2022). Por otro lado, el oxígeno disuelto promedio de 6,93 mg/l refleja una adecuada oxigenación, suficiente para sostener procesos aeróbicos esenciales y mantener la biodiversidad acuática del ecosistema. Estos niveles de OD son consistentes con los niveles encontrados en sitios de humedales menos perturbados, como lo

describen Coccia et al. (2022). Los niveles más altos de OD son típicos de sitios con mejor calidad del agua y menor contaminación orgánica, como se observó en los humedales menos afectados en su estudio (Coccia et al., 2022).

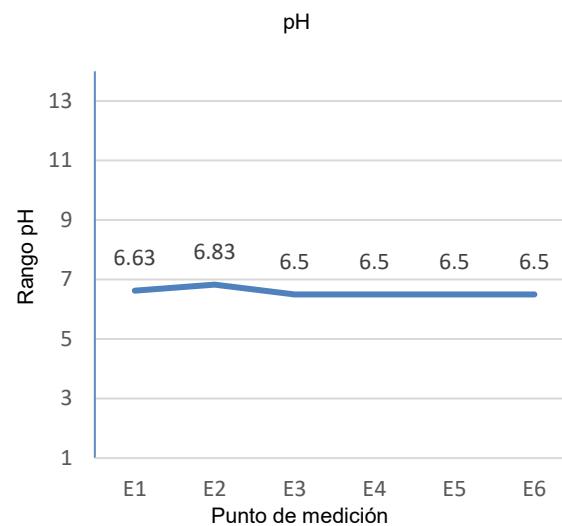


Figura 5. Valores de pH para puntos de medición (E1-E6). *Elaboración Propia.*

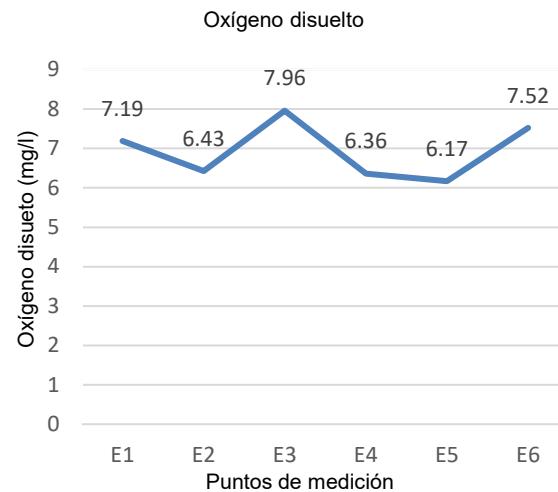


Figura 6. Concentración de Oxígeno disuelto para puntos de medición (E1-E6). *Elaboración propia.*

Para el caso de la DQO (Figura 7), se aprecia ciertas diferencias entre los puntos medidos en especial entre los puntos E6 (11,04 mgO₂/L) y E2 (3,865 mgO₂/L). Estas variaciones pueden atribuirse a diferencias en la carga orgánica local, influenciada por la acumulación de materia

orgánica y residuos vegetales en los sedimentos. No obstante, los valores de DQO en todos los puntos estudiados se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa ambiental vigente en Chile (Teusch Camila et al., 2024).

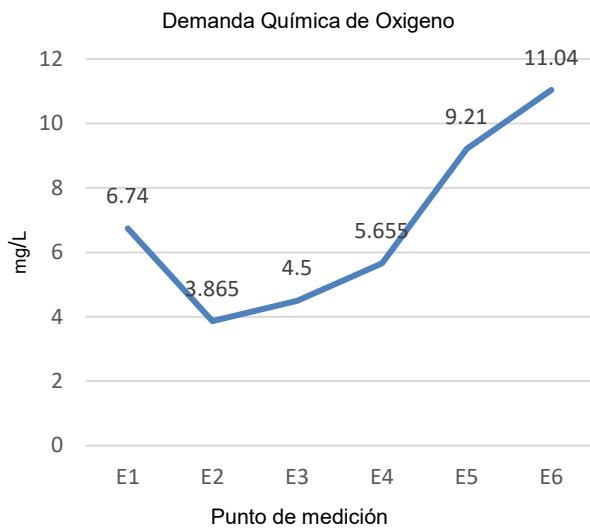


Figura 7. Demanda Química de Oxígeno para puntos de medición (E1-E6). *Elaboración propia.*

La conductividad eléctrica (CE) es un indicador crítico de la calidad del agua, ya que refleja la composición iónica influenciada por factores naturales y antropogénicos. En el humedal estudiado, los valores de CE varían desde 61 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los puntos E4-E6 hasta un máximo de 275 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en E2, lo que indica una variabilidad espacial influenciada por aportes hidrológicos localizados (Figura 8).

La conductividad eléctrica (CE) del agua está directamente relacionada con la presencia de iones disueltos, como cloruros (Cl^-), amonio (NH_4^+), y otros cationes y aniones. Valores elevados de CE suelen indicar altas concentraciones de estos iones, lo que puede ser consecuencia de actividades humanas causada por la escorrentía agrícola y la contaminación industrial. Por ejemplo, un estudio sobre la calidad del agua en el distrito de Udupi, India, encontró que la CE se correlaciona positivamente con la presencia de cloruros y sólidos disueltos totales (Poojashree et al., 2022). Un ejemplo representativo es el humedal El Yali, donde se han registrado niveles elevados de CE, con un promedio superior a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, asociados con altas concentraciones de metales pesados (como Cu y Pb) y salinidad elevada derivada de actividades agrícolas intensivas y contaminación industrial (Rivera et al., 2019).

En contraste, el humedal Luis Ebel, ubicado en una zona residencial, presenta niveles significativamente más bajos de CE (61–275 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esto refleja un menor impacto antropogénico, posiblemente relacionado con fuentes difusas de contaminación urbana. Esta comparación subraya cómo actividades humanas de distinta naturaleza pueden modificar sustancialmente las características fisicoquímicas de los ecosistemas acuáticos, afectando su vulnerabilidad a la degradación ambiental.

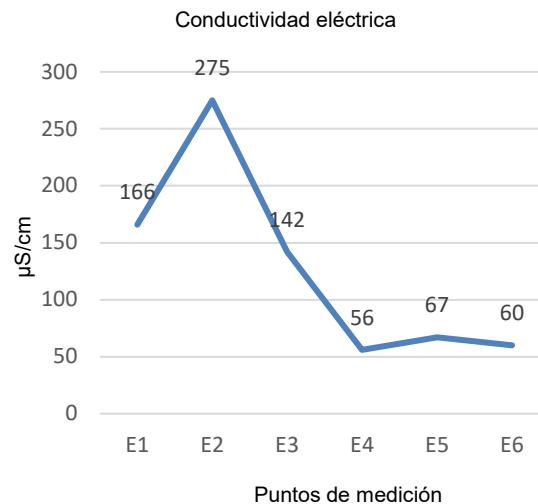


Figura 8. Conductividad eléctrica para puntos de medición (E1-E6). *Elaboración propia.*

El fósforo (P) es un nutriente esencial en los ecosistemas acuáticos, pero su presencia en concentraciones elevadas puede alterar significativamente la calidad del agua y la biodiversidad asociada. En el humedal estudiado, las concentraciones de fósforo varían desde 0,03 mg/L en E6 hasta un máximo de 0,1 mg/L en E1. Estos valores superan los niveles recomendados por el *Phosphorus: Canadian Guidance Framework for the Management of Freshwater Systems*, que establece umbrales de referencia entre 0,01 y 0,05 mg/L para prevenir la eutrofización en sistemas de agua dulce sensibles (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2004). De igual manera, según el Decreto 122 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de Chile, las aguas destinadas a la protección de vida acuática deben mantener concentraciones de fósforo por debajo de 0,025 mg/L para prevenir impactos negativos en los ecosistemas acuáticos (Decreto 122, 2010).

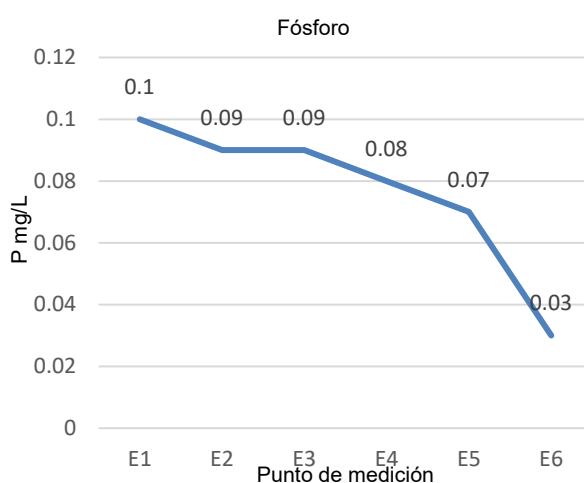


Figura 9. Concentración de Fósforo para puntos de medición (E1-E6). *Elaboración propia.*

La presencia de niveles elevados de fósforo en el humedal puede estar relacionada con fuentes antropogénicas, como el uso de fertilizantes agrícolas, descargas de aguas residuales, y el arrastre de sedimentos ricos en materia orgánica durante eventos de escorrentía. Estudios previos han documentado cómo concentraciones superiores a 0,05 mg/L incrementan significativamente el riesgo de eutrofización, resultando en proliferaciones algales nocivas y la pérdida de oxígeno disuelto en el agua (Carpenter et al., 1998; Schindler, 2012). Estos efectos pueden comprometer la calidad del hábitat para organismos acuáticos sensibles y afectar los servicios ecosistémicos proporcionados por el humedal.

En el humedal estudiado, los puntos con mayores concentraciones de fósforo (E1: 0,1 mg/L y E2: 0,09 mg/L) podrían estar recibiendo aportes directos o difusos de actividades agrícolas o urbanas cercanas. En contraste, los valores más bajos (E6: 0,03 mg/L) podrían reflejar zonas menos impactadas por actividades humanas. Estos resultados subrayan la necesidad de implementar estrategias de manejo que reduzcan los aportes de fósforo, como la regulación del uso de fertilizantes, el tratamiento adecuado de aguas residuales y la restauración de vegetación riparia para minimizar la escorrentía.

3.2. Estimación índice calidad de agua.

Los valores obtenidos de las mediciones anteriormente presentadas fueron normalizados según la escala establecida en la tabla 1.

Tabla 3 Normalización de resultados obtenidos de las mediciones. *Elaboración propia.*

Indicador Medición	Q E-1	Q E-2	Q E-3	Q E-4	Q E-5	Q E-6
pH	1	1	1	1	1	1
OD	2	2	1	2	2	1
CE	1	1	1	1	1	1
DQO	2	1	1	1	2	2
NO_3^-	1	1	1	1	1	1
NO_2^-	1	1	1	1	1	1
P	3	3	3	3	3	2

Con lo que respecta a los parámetros generales, el oxígeno disuelto muestra que cuatro de seis sectores medidos se encuentran en categoría buena, reflejando posibles variaciones en las condiciones ambientales. En el caso de la DQO, solo existen tres sectores con “categoría buena” según el criterio establecido para esta variable. Sin embargo, para los parámetros complementarios, asignados como tal por el riesgo de eutrofización, existen valores elevados de fósforo, lo cual puede estar relacionado con diversos factores. Uno de ellos podría ser las acciones de reforestación realizadas en los alrededores del parque en donde se han empleado fertilizantes.

Una alternativa sostenible al uso de fertilizantes es mejorar el suelo con materia orgánica, como compost o residuos vegetales, lo cual incrementa la fertilidad del suelo y mejora su estructura al tiempo que reduce el riesgo de contaminación por escorrentía de nutrientes. Esto permite una gestión más sostenible de los ecosistemas acuáticos al limitar el transporte de fósforo hacia los cuerpos de agua. Según Hua y Zhu (2020), la aplicación de enmiendas orgánicas,

especialmente combinadas con prácticas agrícolas adecuadas, puede reducir las pérdidas de fósforo en un 71% al mejorar la eficiencia del fósforo en el suelo, disminuyendo la escorrentía y mejorando el equilibrio de nutrientes.

El modelo obtenido clasifica los valores del Índice de Calidad de Agua (ICA) en niveles que varían entre 2 y 3, lo que corresponde a una calidad de agua entre regular y buena. Utilizando la ecuación propuesta para el cálculo del ICA y considerando los valores más elevados parametrizados para cada indicador (generales y complementarios), se calculó este índice para cada punto de medición, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4. Asimismo, la Figura 3 ilustra la distribución espacial de los niveles de calidad del agua en el humedal estudiado.

Tabla 4 Índice de Calidad de agua (ICA) para cada punto de medición (E1-E6). *Elaboración propia.*

Punto de Medición	ICA	Calidad de Agua
E-1	2,51	Regular
E-2	2,51	Regular
E-3	2,02	Regular
E-4	2,51	Regular
E-5	2,51	Regular
E-6	1,51	Buena

De acuerdo con los resultados de la Tabla 4, el sector E-6 es el único que presenta una calidad de agua clasificada como buena, mientras que los otros puntos de medición (E-1 a E-5) se encuentran en la categoría de calidad regular. Este resultado refleja el impacto de los parámetros analizados, destacando el fósforo como uno de los principales contribuyentes a la degradación de la calidad del agua. Tal como se discutió previamente, las concentraciones elevadas de fósforo incrementan el riesgo de eutrofización, lo que representa una amenaza latente para el equilibrio ecológico del humedal.

Es importante señalar que este análisis representa una primera aproximación. Para validar el índice propuesto, es fundamental recolectar una mayor cantidad de datos

que capturen la variabilidad natural de los parámetros en diferentes condiciones estacionales y espaciales. Esto permitirá obtener resultados más robustos y una mejor comprensión del estado de calidad del agua en el humedal.

Para complementar el monitoreo y la determinación de los parámetros medidos, es fundamental realizar un análisis integrado que permita comprender la naturaleza y las variaciones de estos indicadores. Este enfoque facilitará la identificación de fuentes de contaminación y patrones de cambio en el tiempo, siguiendo recomendaciones de investigaciones previas sobre ecosistemas complejos (Davis & Anderson, 2013).

Dada la complejidad inherente de los humedales, es necesario analizar cada sistema de manera individual para diseñar y proponer programas de monitoreo y conservación adaptados a las características particulares de cada ecosistema. Esto resulta esencial para garantizar una gestión eficiente y sostenible. La implementación de un plan de monitoreo adaptado es clave para mantener la calidad del agua y los servicios ecosistémicos del humedal. Con base en la literatura, se propone una estructura general que permita evaluar y prevenir amenazas potenciales. Este plan debe incluir:

- **Monitoreo regular de parámetros clave:** Evaluar pH, oxígeno disuelto, nutrientes (nitratos y fósforo) y conductividad eléctrica para detectar tendencias y cambios temporales en la calidad del agua (Dar & Bhat, 2022).
- **Identificación de fuentes de contaminación:** Considerar fuentes agrícolas e industriales para priorizar acciones preventivas y restaurativas (Knox et al., 2008).
- **Adaptación a nivel de cuenca:** Planificar restauraciones o conservaciones que integren la conectividad hidrológica y las condiciones del paisaje para maximizar los beneficios ecológicos y de calidad de agua (Dar & Bhat, 2022).
- **Enfoque preventivo para amenazas:** Implementar estrategias para reducir las cargas de nutrientes, sedimentos y contaminantes químicos, previniendo

deterioros futuros en la calidad del agua (Wang et al., 2010).

Este plan permitirá no solo mantener la calidad del agua, sino también prevenir la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales como la regulación hídrica y el hábitat para la biodiversidad. Además, metodologías como el uso de índices de calidad del agua, como se ha propuesto en esta investigación, pueden servir como herramientas simples y efectivas para evaluar impactos de forma continua (Bassi & Kumar, 2017).

Las amenazas constantes, como la contaminación y el cambio de uso del suelo, subrayan la importancia de la vigilancia activa y la acción proactiva para evitar la degradación de estos ecosistemas únicos.

4. CONCLUSIONES

El análisis de la calidad del agua en el humedal urbano Luis Ebel mediante el Índice de Calidad de Agua (ICA) permitió identificar variaciones en los niveles de calidad, que oscilaron entre "regular" y "buena". Este índice demostró ser una herramienta eficaz para sintetizar parámetros fisicoquímicos y evaluar el estado del agua en ecosistemas sensibles como los humedales urbanos. Los bajos niveles de nitratos y nitritos sugieren un eficiente equilibrio natural del proceso de nitrificación y la absorción por vegetación acuática, aunque ciertas variaciones locales, como en la demanda química de oxígeno y la conductividad eléctrica, apuntan a la necesidad de monitoreos más específicos para identificar posibles impactos antropogénicos.

Los resultados destacaron que el fósforo es un factor determinante en la calidad del agua, con concentraciones elevadas en ciertos puntos, probablemente debido a actividades humanas como el uso de fertilizantes y escorrentías.

Este estudio subraya la importancia de implementar estrategias de manejo adaptativo, centradas en reducir las fuentes de contaminación y mitigar los impactos de la eutrofización. Además, se resalta la necesidad de un monitoreo continuo y sistemático que permita capturar las dinámicas estacionales y espaciales del humedal.

Finalmente, el enfoque preventivo y la integración de factores biofísicos y socioeconómicos son fundamentales para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de este ecosistema urbano y sus servicios ecosistémicos, ofreciendo un modelo replicable para otros humedales en contextos similares.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo para la ejecución de esta iniciativa de la I. Municipalidad de Puerto Montt, al equipo que gestiona el Humedal Urbano Luis Ebel y en especial a Doris Jorquera. Adicionalmente, se agradece el apoyo en terreno de Felipe Guineo y Maximiliano Pirul. Cabe destacar que este trabajo fue realizado en Marco de un Proyecto de Vinculación con el Medio de la Universidad Bernardo O'Higgins, con la I. Municipalidad de Puerto Montt, la carrera de Ingeniería Civil en Medio Ambiente y Sustentabilidad y el Centro de Investigación en Recursos Naturales y Sustentabilidad.

6. REFERENCIAS

- Aguilar Alba, M., Vetter, M., Mena Berrios, J.B., & Pérez Martínez, T. T. (2010). Modelización del comportamiento de variables limnológicas en relación con el cambio climático en el lago Ammersee (Alemania). *Tecnologías de la información geográfica: la información geográfica al servicio de los ciudadanos*, 1157-1167.
- Bassi, N., & Kumar, M. D. (2017). Water quality index as a tool for wetland restoration. *Water Policy*, 19(3), 390–403. <https://doi.org/10.2166/wp.2017.099>
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2004). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Phosphorus: Canadian Guidance Framework for the Management of Freshwater Systems. In: Canadian environmental quality guidelines, 2004, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological applications*, 8(3), 559-568.
- Coccia, C., Vega, C., & Fierro, P. (2022). Macroinvertebrate-Based Biomonitoring of Coastal Wetlands in Mediterranean Chile: Testing Potential Metrics Able to Detect Anthropogenic Impacts. *Water* (Switzerland), 14(21). <https://doi.org/10.3390/w14213449>

Convención de Ramsar sobre los Humedales. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/gwo_s.pdf

Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26(1), 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>

Dar, S. A., & Bhat, S. U. (2022). Wetland ecosystem monitoring through water quality perspectives. *Handbook of Research on Monitoring and Evaluating the Ecological Health of Wetlands*, 51–70.

Davis, C. A., & Anderson, J. T. (Eds.). (2013). *Wetland Techniques* (Vol. 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6860-4>

Decreto 122 (2010). Establece normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas del lago Llanquihue. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Santiago, 17 de noviembre de 2009.

Girardi C., Rachel Charte, Mariela Elorrieta, Fernando González, Sebastián Jara, Andrea Arancibia, & Iván Castillo. (2018). Metodología de Construcción de Índice de calidad para aguas superficiales (Issue Escenarios Hídricos 2030).

Hua, K., & Zhu, B. (2020). Phosphorus loss through surface runoff and leaching in response to the long-term application of different organic amendments on sloping croplands. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 3459-3471. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02675-3>

Herbert, E. R., Boon, P., Burgin, A. J., Neubauer, S. C., Franklin, R. B., Ardon, M., Hopfensperger, K. N., Lamers, L. P. M., Gell, P., & Langley, J. A. (2015). A global perspective on wetland salinization: Ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. In *Ecosphere* (Vol. 6, Issue 10). Ecological Society of America. <https://doi.org/10.1890/ES14-00534.1>

Kingsford, R. T., Basset, A., & Jackson, L. (2016). Wetlands: conservation's poor cousins. In *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* (Vol. 26, Issue 5, pp. 892–916). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/aqc.2709>

Knox, A. K., Dahlgren, R. A., Tate, K. W., & Atwill, E. R. (2008). Efficacy of Natural Wetlands to Retain Nutrient, Sediment and Microbial Pollutants. *Journal of Environmental Quality*, 37(5), 1837–1846. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0067>

Ley Nº 21.202, modifica diversos cuerpos legales con el objetivo de proteger los humedales urbanos. Diario Oficial de la República de Chile, 23 de enero de 2020. <https://bcn.cl/2fff9>

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis: a report of the Millennium Ecosystem Assessment*. World Resources Institute.

MMA, (2024), Ministerio del Medio Geoportal SIMBIO. Revisado 3 agosto desde <https://apps.mma.gob.cl/visorsimbio>

Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands. Water Resources*, 736. <https://www.wiley.com/en-be/Wetlands%2C+5th+Edition-p-9781119019787>

MMA-ONU Medio Ambiente. (2022). Guía de monitoreo de humedales. Elaborada por María Jesús Suazo Suazo, consultora proyecto GEF/SEC ID_9766 "Conservación de humedales costeros de la zona centro sur de Chile" Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile. 48p.

Prigent, C., Papa, F., Aires, F., Jimenez, C., Rossow, W. B., & Matthews, E. (2012). Changes in land surface water dynamics since the 1990s and relation to population pressure. *Geophysical Research Letters*, 39(8).

Poojashree, B. P., Peladdy, B., Kaveri, H., Akkivalli, P., & Swathi, L. A. (2022). Determination of Physio-Chemical Parameters and Water Quality Index (Wqi) of Kundapura Taluk, Udupi District, Karnataka, India. *Pollutants*, 2(3), 388-406. <https://doi.org/10.1029/2012GL051276>

Rivera, C., Quiroga, E., Meza, V., & Pastene, M. (2019). Evaluation of water quality and heavy metal concentrations in the RAMSAR Wetland El Yali (Central Chile, 33°45"S). *Marine Pollution Bulletin*, 145, 499–507.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.054>

Rodríguez-Jorquera, I., Rivera-Bravo, D., Sciaraffia, F., Márquez García, M., Tomasevic, J.A., Mellado, C., & Möller, P. 2020. "Propuesto de criterios mínimos para la sustentabilidad de humedales urbanos en Chile". Informe Final. Centro de Humedales Río Cruces de la Universidad Austral de Chile, Centro de Derecho y Gestión de Aguas de la Pontificia Universidad Católica de Chile, GeoAdaptive LLC y Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile.

Schindler, D. W. (2012). The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1746), 4322-4333.

Teusch C., Scheuch T., Fernández, Briceño F., Vattuone C., Domínguez J. C., Riveros A., Pichunleo E., Moreno O., & Gironás J.. (2024). Exploring the Behavior of Llanquihue's Urban Wetlands: Lessons Learnt and Perspectives for Water-Sensitive Urban Design. *Urban Wetlands in Latin America: Protection, Conservation, Innovation, Restoration, and Community for Sustainable and Water Sensitive Cities.*, 73–88.

Villagrán-Mella, R. Aguayo, M. Parra, L. E. & González, A. (2006). Relación entre características del hábitat y estructura del ensamble de insectos en humedales palustres urbanos del centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 195–211.

Wang, X., Shang, S., Qu, Z., Liu, T., Melesse, A. M., & Yang, W. (2010). Simulated wetland conservation-restoration effects on water quantity and quality at watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 91(7), 1511–1525. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.023>

