



Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería en Medioambiente

**EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DEL HUMEDAL
URBANO LAGUNA Y ESTERO CATAPILCO PARA
PROPUESTAS DE CONTROL DE EUTROFIZACIÓN.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL.**

AUTOR: Simón Venegas Artaza

PROFESOR GUÍA: Hernán Gaete Olivares

VALPARAÍSO, 2024.

Índice

Índice de figuras	3
Índice de tablas.....	3
1. Introducción.....	7
1.1. Humedales	7
1.2. Proceso de eutrofización.	9
1.3. Área de estudio.	11
2. Problema	14
3. Objetivos	17
3.1. Objetivo General.....	17
3.2. Objetivos Específicos	17
4. Metodología.....	18
4.1. Caracterización física y química el cuerpo de agua.	18
4.1.1 Determinación de las variables a analizar.	18
4.1.2 Determinación de la ubicación de los puntos de muestreo.	19
4.1.3 Toma de muestras y medición en terreno de las variables seleccionadas en los puntos definidos.	21
4.1.4 Análisis de muestras en laboratorio.....	22
4.1.5 Identificación y estimación de las fuentes de nutrientes.	24
4.2. Determinación del estado trófico del cuerpo de agua.....	25
4.2.1 Clasificación según Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas.	27
4.2.2 Clasificación según Índice TSI de Smith et al. (1999).....	27
4.3 Elaboración de propuestas de control.....	28

5.	Resultados	29
5.1	Resultados del Objetivo 1.	29
5.1.1	Toma de muestras y medición en terreno.	29
5.1.2	Análisis en laboratorio.....	31
5.1.3	Identificación y estimación de las fuentes de nutrientes.	33
5.2.	Resultados del Objetivo 2.....	34
5.3	Resultados del Objetivo 3.	36
5.3.1	Humedal Artificial de <i>T. Angustifolia</i>	37
5.3.2	Biorrollos perimetrales con <i>T. Angustifolia</i>	41
6.	Discusión	42
7.	Conclusión.....	45
8.	Bibliografía	46

Índice de figuras

Figura 1.1: Esquema del proceso de eutrofización.	10
Figura 1.2: Ubicación y polígono de HU Laguna y Estero Catapilco.	12
Figura 1.3: Distribución espacial de las amenazas identificadas para el HU Laguna y Estero Catapilco. (Fuente: PGIHU Laguna Estero Catapilco).....	15
Figura 4.1: Ubicación de los puntos de muestreo. (Fuente: Elaboración propia).....	20
Figura 4.2: División zonal en función del grado de urbanización (Fuente: Elaboración propia).	21
Figura 5.1: Polígonos definidos como sectores de potencial descarga de aguas residuales en PGIHU Laguna y Estero Catapilco.....	33
Figura 5.2: Esquema de HFSS. (Fuente: Guía de Soluciones Sanitarias Sustentables (MINAGRI & CONAF, 2018).	38
Figura 5.3: Ubicación proyectada para HFSS.	40
Figura 5.4: Ubicación recomendada para biorrollos.	42

Índice de tablas

Tabla 1.1: Características morfométricas del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco. .	12
Tabla 1.2: Valores obtenidos en el HU Laguna y Estero Catapilco, de los cuatros parámetros relativos al estado trófico según Smith et al. (1999). Campaña verano 2022. Destacado en rojo los valores que sugieren un estado Hipereutrófico. LD, límite de detección.	14
Tabla 4.1: Variables a evaluar y sus respectivos instrumentos de medición.	18
Tabla 4.2: Coordenadas de los puntos de muestreo (UTM Datum WGS 84, Huso 19S).....	20
Tabla 4.3: Clasificación de las aguas según valor de pH (Hounslow 1995).....	22
Tabla 4.4: Clasificación de las aguas según concentración de sólidos totales disueltos (Davis et al., 2003).....	22
Tabla 4.5: Rangos establecidos por guía CONAMA para determinar estados tróficos en cuerpos lacustres. (Fuente: Modificado de Tabla 2 de Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas).....	27
Tabla 4.6: Rangos establecidos por Smith et al. (1999). Para la clasificación de estado trófico. (Fuente: Modificado de Pradenas, 2021).....	28
Tabla 5.1: Valores de los parámetros medidos en terreno para muestreo de mayo 2023.	29

Tabla 5.2: Caracterización de la calidad del agua en función de su pH y Salinidad para muestreo de mayo 2023.	29
Tabla 5.3: Resultados de los parámetros medidos en terreno para muestreo del 3 de octubre 2024.	30
Tabla 5.4: Caracterización de la calidad del agua en función de su pH y salinidad para muestreo del 3 de octubre 2024.	31
Tabla 5.5: Valores de las concentraciones de nutrientes obtenidos del análisis fotométrico para el muestreo de mayo 2023.	32
Tabla 5.6: Absorbancia y concentración de Clorofila A para el muestreo de mayo 2023.	32
Tabla 5.7: Valores de las concentraciones de nutrientes obtenidos del análisis fotométrico para el muestreo de octubre 2024.	32
Tabla 5.8: Absorbancia y concentración de Clorofila A para el muestreo de octubre 2024. ...	33
Tabla 5.9: Carga de nitrógeno y fósforo total en HU Laguna y Estero Catapilco.	34
Tabla 5.10: Evaluación del estado trófico según Guía CONAMA para el establecimiento de las N.N.S.S. de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, para muestreo realizado el 30 de mayo 2023.	35
Tabla 5.11: Evaluación del estado trófico según índice propuesto por Smith et al. (1999), para muestreo realizado el 30 de mayo 2023.	35
Tabla 5.12: Evaluación del estado trófico según Guía CONAMA para el establecimiento de las N.N.S.S. de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, para muestreo realizado el 03 de octubre 2024.	35
Tabla 5.13: Evaluación del estado trófico según índice propuesto por Smith et al. (1999), para muestreo realizado el 03 de octubre 2024.	36
Tabla 5.14: Evaluación del estado trófico de los valores promedio según Guía CONAMA para el establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, e índice propuesto por Smith et al. (1999), para ambas campañas de muestreo.	36
Tabla 5.15: Taxas más utilizadas en sistemas de HA y sus principales características. (Fuente: Delgadillo et al., 2010).	39

Lista de acrónimos

CONAF:	Corporación Nacional Forestal
CONAMA:	Comisión Nacional del Medio Ambiente
FS:	Humedales de Flujo Subsuperficial
HFSS:	Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal
HU:	Humedal Urbano
INN:	Instituto Nacional de Normalización
MMA:	Ministerio del Medio Ambiente
OAECA:	Organismos del Estado con Competencia Ambiental
PGIHU:	Plan de Gestión Integral del Humedal Urbano
TSI:	Índice de Estado Trófico (Trófic State Index)
VFSS:	Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical
ZUI:	Zona de Urbanización Intensiva
ZUM:	Zona de Urbanización Moderada

Resumen

Los humedales son ecosistemas esenciales que proporcionan servicios ecosistémicos de gran relevancia, pero se encuentran en riesgo al estar sometidos a diferentes presiones antrópicas, especialmente aquellos ubicados dentro de los límites urbanos. Recientemente, en Chile se generó una normativa ambiental que protege estos cuerpos de agua urbanos, llamados “Humedales Urbanos”, a través de la promulgación de la Ley 21.202. En este contexto, se declaran como objetos de conservación aquellos cuerpos de agua que se encuentren total o parcialmente dentro de los límites urbanos. Este es el caso del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco, un cuerpo de agua ubicado en la Región de Valparaíso, entre las comunas de Puchuncaví y Zapallar. Aunque se encuentra sometido a una urbanización importante, este humedal carece de estudios actualizados y detallados sobre su estado trófico, lo que dificulta la formulación de medidas de control efectivas para la conservación de este ecosistema.

El objetivo principal es evaluar el estado trófico del humedal como base para su manejo ambiental, mediante la caracterización física y química del agua, la clasificación de su estado trófico aplicando los criterios tanto de la Guía CONAMA (2004), como del Índice de Smith et al. (1999), y la generación de propuestas de control adaptadas a las condiciones locales. Para esto, se tomaron muestras de agua en siete puntos del humedal durante dos campañas estacionales (primavera y otoño), midiendo parámetros como fósforo, nitrógeno, clorofila A y transparencia de agua o penetración de luz, lo que permitió categorizar el estado trófico de acuerdo con los índices seleccionados.

Los resultados indican que el humedal presenta baja transparencia, altos niveles de fósforo y variabilidad en los niveles de nitrógeno, mostrando tendencias claras hacia la eutrofización, especialmente en las zonas más expuestas a actividades humanas. Ambos índices confirman un estado eutrófico-hipereutrófico, destacando al fósforo como el principal agente promotor de eutrofización en el humedal. En base a estos hallazgos, se propone la creación de un humedal artificial y la instalación de biorollos, ambos con *Typha angustifolia*, una solución de bajo costo y alta efectividad para reducir la concentración de fósforo.

1. Introducción

1.1. Humedales

El medio ambiente, según la definición establecida en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente en Estocolmo (1972), es “el conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos y sociales capaces de causar efectos directos o indirectos, en un plazo corto o largo, sobre los seres vivos y las actividades humanas”. En este contexto, se insertan ecosistemas que representan a cabalidad esta cualidad y que forman parte clave de un medioambiente integro, como es el caso de los humedales. Existen diferentes definiciones para estos ecosistemas acuáticos, sin embargo, la más conocida y comúnmente aceptada, incorporada también en nuestro país por medio de la Ley 21.202, es la que se adoptó en la Conferencia Internacional de Ramsar (Irán) de 1971 y que los describe como: “Marismas, pantanos, turberas, aguas rasas naturales, artificiales, permanentes o temporales de aguas remansadas o corrientes, dulces, salobres o salinas con intrusión de las aguas marinas cuya profundidad en marea baja no excede de los 6m”. Estos cuerpos de agua son ecosistemas esenciales para incrementar el desarrollo a nivel nacional e internacional pues desempeñan un papel significativo desde el punto de vista socioeconómico y ecológico debido a la amplitud de servicios ecosistémicos que nos proveen, tales como abastecimiento de agua, saneamiento ambiental, control de inundaciones, fuentes de alimento, brindan recursos forestales, recursos de vida silvestres, pesquerías, recursos forrajeros para alimentar animales y facilidades para desarrollar algunas actividades agrícolas. Por otra parte, los humedales controlan la erosión, retienen sedimentos y nutrientes y estabilizan el clima, además de servir como medio de transporte, recreación, ecoturismo y vida silvestre. Estos servicios ecosistémicos son, sin embargo, posibles sólo en la medida en que los procesos y relaciones de los componentes de este ecosistema y los flujos de materia y energía no sean comprometidos por la intervención antrópica de estos ecosistemas acuático-terrestres, fundamentales para la biodiversidad, al punto de deteriorar la matriz ambiental, eliminar algunos de sus componentes o generar perturbaciones al introducir elementos exóticos (Negrete et al., 2015). Pese a esto, actualmente se encuentran entre los ecosistemas más amenazados a nivel mundial por la constante explotación, contaminación, conversión y uso no sostenible de sus recursos (Merizalde, 2020).

A su vez, las lagunas costeras son consideradas uno de los ecosistemas de mayor productividad biológica, pero al estar sometidas a diversas presiones humanas, éstas son especialmente vulnerables a los desequilibrios tróficos; y aunque las crisis distróficas son comunes en muchas lagunas, otras muestran mecanismos homeostáticos y alta resiliencia. Lo anterior manifiesta las diferencias en la eficiencia de los diferentes cuerpos de agua para procesar, asimilar o diluir los nutrientes que reciben, lo cual se relaciona a sus características geomorfológicas y tasas de renovación del agua, así como a las influencias climáticas y oceanográficas a las que están sujetos (Medina et al., 2022).

En la búsqueda de proteger estos ecosistemas esenciales y mitigar los impactos negativos derivados de la actividad humana, es que se han establecido acuerdos internacionales que buscan verse reflejados a través de marcos normativos nacionales responsables y consecuentes con el uso racional y sostenible del recurso hídrico.

A nivel internacional, el Convenio de Ramsar sobre Humedales, adoptado en 1971, es el principal instrumento legal para la conservación y el uso racional de los humedales. Este convenio reconoce su importancia ecológica, económica, cultural y científica. Chile, signatario desde 1981, cuenta con 18 sitios Ramsar designados, lo que demuestra su compromiso con la protección de estos ecosistemas esenciales (Ramsar, 2010).

Mientras que, en el contexto nacional, la Ley 21.202 de 2020 marcó un hito al introducir el concepto de humedales urbanos (HU) en la legislación chilena, modificando diversos cuerpos legales con el objetivo de declarar y proteger los ecosistemas de humedales que se encuentren total o parcialmente dentro del límite urbano, estableciendo así un marco regulatorio para proteger estos ecosistemas. Esta ley obliga a los municipios y al Ministerio del Medio Ambiente (MMA) a declarar y proteger humedales urbanos, de esta manera un cuerpo de agua puede ser declarado como humedal urbano tanto por oficio del Ministerio de Medioambiente, como por solicitud de la Municipalidad correspondiente, con lo que los municipios obtienen herramientas concretas que permiten proteger los HU, a través de la elaboración de Ordenanzas Generales que restrinjan actividades que pongan en peligro su equilibrio ecológico, como la postergación de permisos de subdivisión predial, loteo, urbanización y de construcciones, además de establecer que los humedales urbanos declarados por el Ministerio del Medio Ambiente deben ser incluidos en los Instrumentos de Planificación Territorial a toda escala como “área de protección de valor natural”. Esto en virtud de la gran relevancia que estos ecosistemas tienen para las ciudades, actuando como áreas verdes, espacios para la recreación, control de inundaciones, mitigación al cambio climático, entre otros; y las fuertes amenazas bajo las cuales estos se encuentran (BCN, 2020).

A lo anterior se suma la Norma Chilena 1333 (INN, 1978), regula la calidad del agua para diversos usos, incluyendo la protección de la vida acuática y el riego, estableciendo límites para sustancias contaminantes. Aunque no es específica para humedales, esta norma proporciona parámetros técnicos esenciales para la conservación de los cuerpos de agua que los alimentan.

Como complemento, los organismos del estado proporcionan continuamente de documentos técnicos que, si bien no son normativos, proponen criterios para el estudio y conservación de estos ecosistemas al ser considerados por los organismos del estado con competencia ambiental (OAECA) a la hora de evaluar proyectos de desarrollo en los procesos de evaluación ambiental. Ejemplo de esto es la *Guía de Delimitación y Caracterización de Humedales Urbanos de Chile* (MMA, 2021), que establece lineamientos técnicos para la

identificación, delimitación y caracterización de humedales urbanos. Este documento facilita su incorporación en los planes de ordenamiento territorial y promueve estrategias de manejo y conservación adaptadas a las particularidades de cada ecosistema (MMA, 2021).

Junto con esto, la Guía para el Establecimiento de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales y Marinas (CONAMA, 2004) proporciona criterios para evaluar la calidad del agua en relación con su estado trófico y otros indicadores clave, estableciendo con esto constituyendo una herramienta fundamental para el establecimiento de normativas nacionales de conservación ambiental.

Un ejemplo destacado de regulación específica es la Norma Secundaria de Calidad Ambiental del Lago Villarrica, promulgada a través del Decreto 19, en 2013, constituye la primera norma de este tipo aplicada a un cuerpo de agua en el país. Esta norma establece límites y criterios para mantener la calidad del agua del lago, considerado un ecosistema clave por su relevancia ambiental, turística y cultural. Si bien se enfoca específicamente en un el Lago Villarrica, sirve como referente para la aplicación de estándares similares en otros cuerpos de agua, mostrando cómo la regulación puede adaptarse a las características particulares de un ecosistema.

En el ámbito local, el Plan de Gestión Integral del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco (PGIHU, 2021) refleja la aplicación de estas normativas al contexto particular del estudio. Desarrollado en colaboración con actores municipales, comunitarios y profesionales del área ambiental, aborda amenazas concretas como la contaminación, la expansión urbana descontrolada y los efectos del cambio climático, alineándose con los objetivos de conservación establecidos por la Ley 21.202.

1.2. Proceso de eutrofización.

El término “eutrofización” viene del griego y está formado por el prefijo (*eu*): bien, bueno; añadido a (*trofé, és*): alimentación, nutrición; el infijo (*isis*): formación, operación; y el sufijo (*ción*): resultado de la acción; su significado literal es “resultado o efecto de una buena alimentación”. La eutrofización durante mucho tiempo fue considerada como un proceso natural, un resultado de la descarga normal de nutrientes, sedimentos y otros materiales alóctonos en los sistemas acuáticos durante millones de años, en el cual un lago por ejemplo que recibía los aportes, se transformaba con el tiempo en una ciénaga que, al consolidarse, se convertía en un sistema terrestre. Este proceso tiene lugar en cientos de miles de años y es irreversible. Actualmente se habla de “Eutrofización Cultural” o “Eutrofización”, refiriéndose a aquella que está asociada a la intervención del ser humano y que puede desarrollarse en escalas temporales mucho más cortas (Zouiten, 2012).

En los ecosistemas acuáticos eutrofizados, se ven alteradas la biota y la diversidad biológica, provocando una proliferación de algas y de macrófitas en exceso que, al morir, se depositan

en el fondo de los medios acuáticos generando residuos orgánicos que se descomponen consumiendo una gran parte del oxígeno disuelto. Esto puede afectar a la vida acuática y producir la muerte por asfixia de la micro y macrofauna (Zouiten, 2012).

En detalle, se pueden distinguir cuatro principales fases para el proceso de eutrofización de un cuerpo de agua (Figura 1.1):

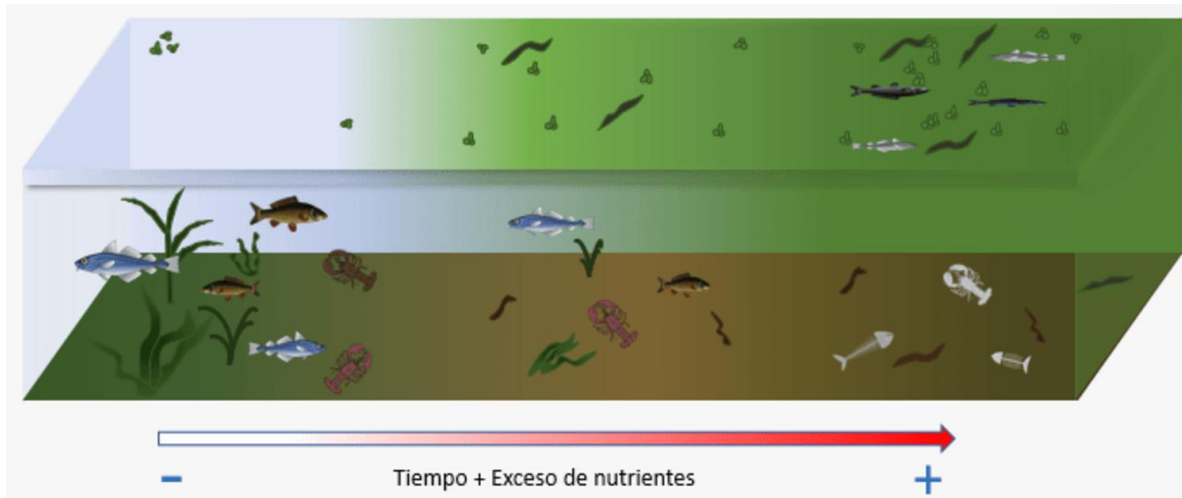


Figura 1.1: Esquema del proceso de eutrofización.

1. Las altas concentraciones de nutrientes pueden desencadenar proliferaciones masivas de fitoplancton. Estos blooms ocurren en grandes extensiones e impiden que la luz penetre en el agua hasta las zonas más profundas. De esta manera se inhibe el crecimiento de plantas a mayor profundidad y, en consecuencia, se reduce la biodiversidad y la oxigenación.
2. A medida que el fitoplancton muere es remineralizado por parte de las bacterias aerobias que se alimentan del detrito. Este proceso utiliza esencialmente el oxígeno disuelto en el agua. Cuando el proceso es muy generalizado esta descomposición bacteriana puede utilizar tanto oxígeno, que vuelve inviable el desarrollo de otros organismos aeróbicos.
3. El fondo del ecosistema acuático se va convirtiendo de forma gradual en un ambiente anaerobio, promoviendo el desarrollo de microorganismos anaeróbicos, cuyo metabolismo produce un aumento en la concentración de gases como ácido sulfhídrico (H_2S), metano (CH_4) y anhídrido carbónico (CO_2), haciendo inviable la forma de vida de la mayoría de las especies que forman dicho ecosistema.
4. En la última fase, se produce una muerte masiva de peces y de la biota en general, acompañada de bioacumulación de sustancias tóxicas. Aumenta, por lo tanto, la sedimentación en el cuerpo de agua, reduciendo su capacidad de sostener vida y propiciando la proliferación de organismos patógenos, vectores de enfermedades y malos olores.

1.3. Área de estudio.

La localidad de Maitencillo, ubicada a 15 km al noroeste de la comuna de Puchuncaví (comuna a la que pertenece) e inmediatamente al sur de la comuna de Zapallar, presenta un clima templado mediterráneo de tipo costero subhúmedo, esta región bioclimática se extiende desde Zapallar hacia el sur por la zona costera y precordillerana, abarcando desde el norte de la provincia de O'Higgins hasta la provincia de Talca (Di Castri & Hajek, 1976), con una temperatura promedio anual de 14°, una humedad relativa media de 75% y cuyas precipitaciones alcanzando los 450 mm al año. En esta localidad, residen 1.527 habitantes permanentes según Dirección de Desarrollo Comunitario de la I. Municipalidad de Puchuncaví (DIDECO, 2021), cuya economía está basada principalmente en los rubros relacionados con la pesca artesanal, el comercio (particularmente el vinculado con los restaurantes), la artesanía y el turismo, sin perjuicio de otras actividades que dan el sustento económico a la comuna de Puchuncaví, dentro de las que destaca la actividad de la construcción vinculada al desarrollo de condominios en los sectores turísticos.

En este sector circula el Estero Catapilco, este cause posee zonas intensamente intervenidas, principalmente por actividades forestales, agrícolas e inmobiliarias. El uso de las aguas se relaciona principalmente a usos forestales, agrícolas, recreativos y urbanos, por lo que recibe cargas de emisiones de residuos líquidos puntuales y difusos. Esta heterogeneidad de actividades genera amenazas a este ecosistema, las que son más patentes en el tercio terminal del estero al llegar a la desembocadura, donde se forma La Laguna que sustenta una importante biodiversidad acuática, proveyendo de servicios ecosistémicos de recreación y turismo a la comunidad (Photosíntesis, 2023).

La Estrategia y Plan de Acción para la Conservación de la Diversidad Biológica de la Región de Valparaíso (CONAMA, 2005) determinó cinco sitios prioritarios en la comuna de Zapallar, de los cuales cuatro están ubicados dentro de la cuenca del Estero Catapilco. Entre estos, destaca el Humedal Laguna y Estero Catapilco, que, en 2008, fue designada como área prohibida de caza por el Ministerio de Agricultura a través del Decreto Exento N°465. Siguiendo esta línea, en 2021 se declara, en el marco de la Ley N°21.202 por oficio del Ministerio de Medioambiente, el Humedal Urbano (HU) Laguna y Estero Catapilco mediante la Resolución exenta N°1.409.

Este cuerpo de agua, y a la vez, el objeto de estudio en cuestión, corresponde a un humedal natural, lacustre, estuarino y ribereño permanente, ubicado entre las comunas de Puchuncaví y Zapallar, región de Valparaíso (Figura 1.2), cuenta con 19,9 hectáreas de superficie total y 1,886 km de longitud lineal (Tabla 1.1) y se ubica totalmente dentro del límite urbano.

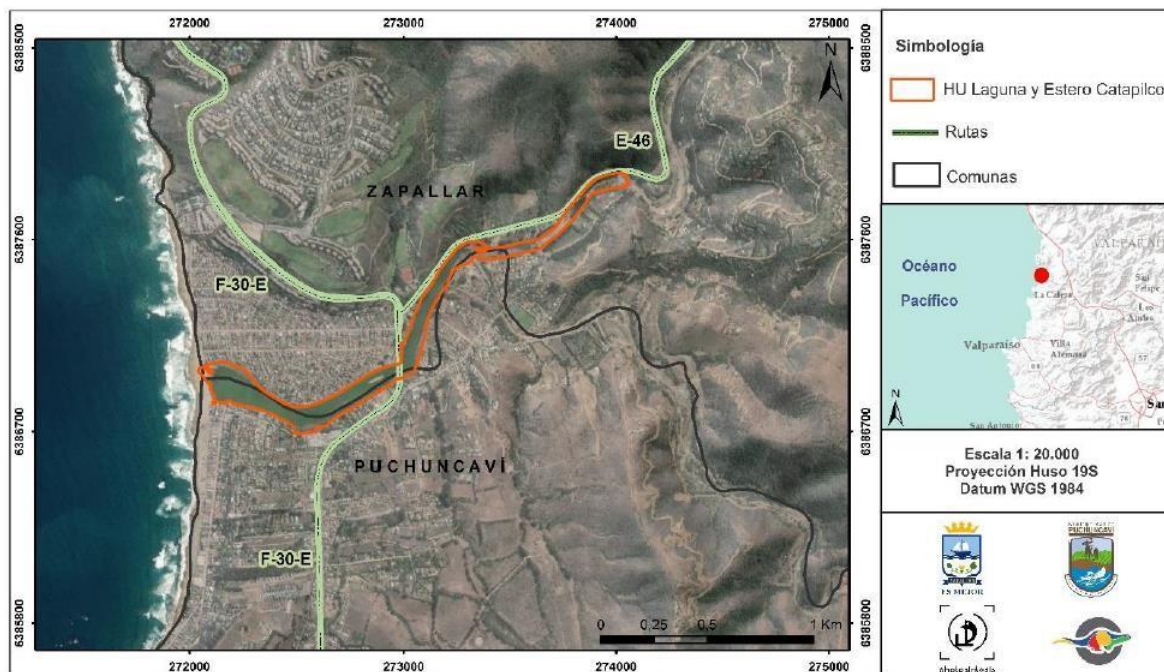


Figura 1.2: Ubicación y polígono de HU Laguna y Estero Catapilco.

Tabla 1.1: Características morfométricas del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco.

Parámetro	Valor
Coordenada Este (UTM Datum WGS 84, Huso 19S)	272580.72
Coordenada Norte (UTM Datum WGS 84, Huso 19S)	6386796.99
Altura media (m.s.n.m.)	9
Largo máx. (km)	1,886
Perímetro (km)	5,74
Superficie (km ²)	0,199
Régimen	100% Pluvial

Como antecedente sobre el estado trófico de este cuerpo de agua dentro de la última década se encuentra el Plan de Gestión Integral del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco, documento elaborado de forma colaborativa entre las municipalidades implicadas en la administración del humedal (Puchuncaví y Zapallar), junto con la OCB Chinchimén y la consultora ambiental Photosíntesis, durante los años 2021 y 2022. Durante este proceso se

realizó un monitoreo de calidad de agua por Fotosíntesis Consultores en verano del año 2022, con el propósito de establecer una línea base general del estado del HU. En este monitoreo se establecieron tres puntos de muestreo (C-1, D-1 y T-1) distribuidos a lo largo del humedal (Figura 1.3), donde se evaluaron las concentraciones de fósforo y nitrógeno total, clorofila A y penetración de luz, parámetros requeridos para la aplicación del índice de estado trófico de Smith et al. (1999) utilizado en el estudio, siendo esta la única instancia en la que se ha intentado caracterizar la condición trófica del humedal en la década más reciente.

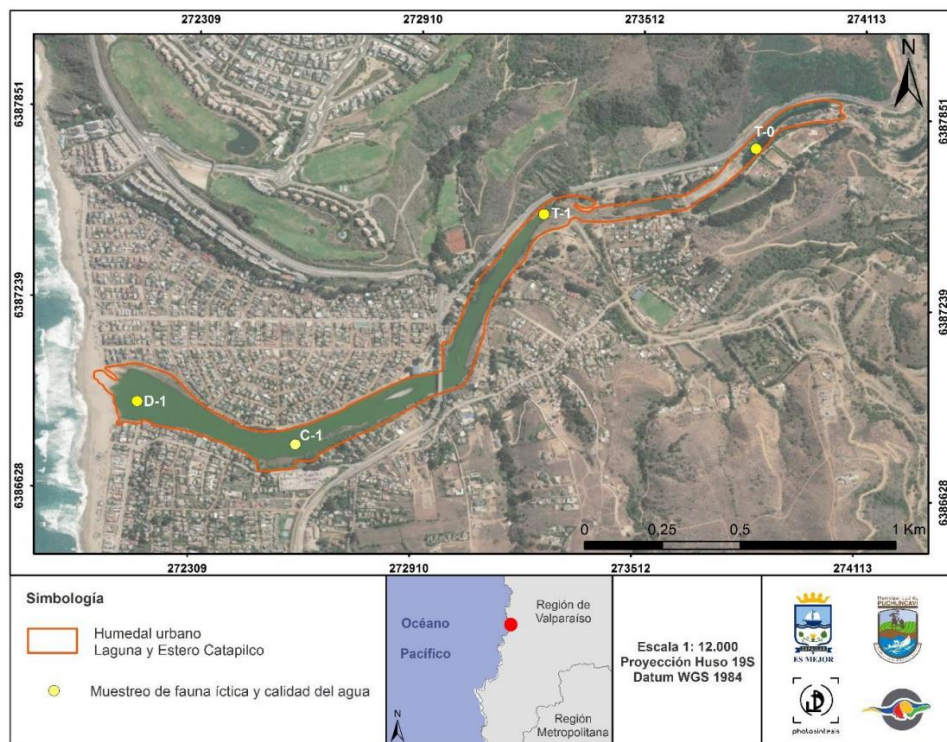


Figura 1.3: Puntos de muestreos utilizados en la caracterización de calidad de agua por Fotosíntesis Consultores (Fuente: PGIHU Laguna y Estero Catapilco).

Los resultados de este monitoreo expresados en la Tabla 1.2 arrojaron que, las altas concentraciones de fósforo total (2400 ug/L) como la baja transparencia (0,5 m) evaluada a través de disco Secchi, corresponden a un cuerpo de agua en estado hipereutrófico dentro de los rangos establecidos por el índice trófico de Smith et al. (1999).

Tabla 1.2: Valores obtenidos en el HU Laguna y Estero Catapilco, de los cuatros parámetros relativos al estado trófico según Smith et al. (1999). Campaña verano 2022. Destacado en rojo los valores que sugieren un estado Hipereutrófico. LD, límite de detección.

Puntos de muestreo	Fósforo Total ug/L	Nitrógeno total ug/L	Clorofila-a ug/L	SD m
C-1	<LD500	<LD500	<LD200	0,5
D-1	<LD500	<LD500	<LD200	0,5
T-1	2.400	<LD500	<LD200	-

Este estudio constituye una alerta del avanzado grado de eutrofización que presenta el cuerpo de agua, pero, debido a que gran parte los parámetros medidos arrojaron resultados por debajo del límite de detección de los equipos utilizados, son insuficientes para conocer con precisión el estado trófico en que se encuentra el humedal, por lo que, si bien es un recurso útil, no constituye un antecedente sólido en cuanto al estado trófico del humedal urbano.

2. Problema

De acuerdo con Merizalde (2020), desde el año 1900 se ha perdido el 64% de los humedales existentes en el planeta, generando que aproximadamente dos mil millones de personas pierdan el acceso al agua dulce. Además, entre 1970 y 2010 disminuyó en un 76% la diversidad de especies presentes en ellos. Esto se debe a que las perturbaciones antrópicas impactan significativamente en la biodiversidad, afectando a grupos funcionales relevantes y disminuyendo considerablemente la riqueza de especies y la capacidad de estos cuerpos de agua para proveer servicios ecosistémicos esenciales para el buen funcionamiento tanto de los ecosistemas como de las dinámicas humanas.

Estas preocupaciones globales son reflejadas a nivel local, donde los factores contribuyentes proporcionan las condiciones e intensifican los efectos que las amenazas directas generan sobre estos ecosistemas. Las amenazas directas se definen como principalmente actividades humanas o procesos que han causado, están causando o podrían causar la destrucción, degradación o deterioro de un Objeto de Conservación (MMA, 2023). En el caso específico del objeto de estudio, el Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco, las principales amenazas a las que se ve expuesto fueron identificadas durante el proceso de elaboración del Plan de Gestión Integral del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco (Photosíntesis, 2023). Este levantamiento de amenazas se llevó a cabo a través de talleres virtuales con actores relevantes, incluyendo profesionales de los municipios y de servicios públicos, así como talleres participativos presenciales con la comunidad local, resultando en las siguientes amenazas identificadas y descritas en el respectivo documento:

- Contaminación de agua y suelo.
- Contaminación del aire.
- Extracción no sustentable de agua.
- Presencia de animales domésticos.
- Intrusión y perturbación humana.
- Presencia de especies exóticas invasoras.
- Cambio climático y disminución de precipitaciones.
- Extracción de Áridos.
- Relleno y modificación del cauce.
- Contaminación acústica y lumínica.
- Desastres naturales e inundaciones.
- Microbasurales y residuos sólidos.

Pudiendo estas desglosarse en distintas actividades cuya distribución espacial a lo largo del humedal se expone en la Figura 2.1:

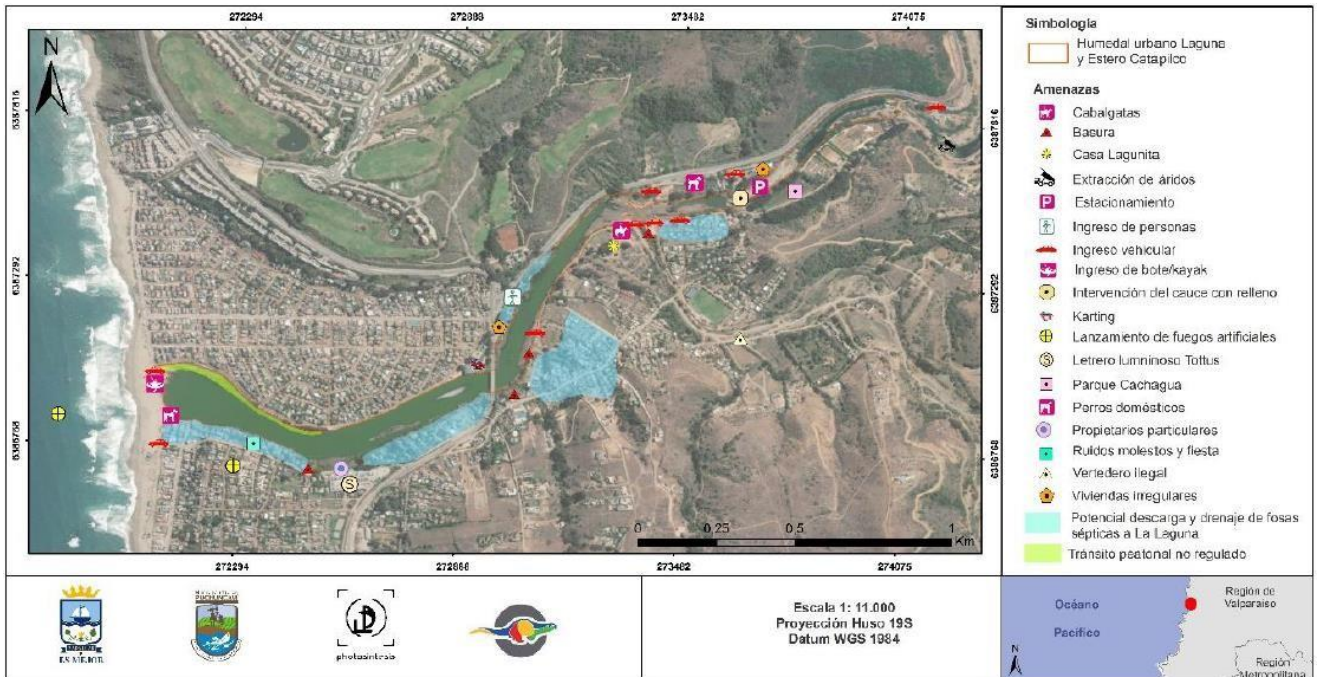


Figura 2.1: Distribución espacial de las amenazas identificadas para el HU Laguna y Estero Catapilco. (Fuente: PGIHU Laguna Estero Catapilco).

Parte de estas actividades conllevan al ingreso de materia orgánica al cuerpo de agua, acelerando de esta manera el proceso de eutrofización del humedal, alterando el equilibrio ecológico y afectando negativamente la calidad del agua y la biodiversidad.

A pesar de la importancia ecológica, cultural y económica del humedal, existe una falta de antecedentes sólidos sobre su estado trófico, ya que el único monitoreo previo significativo, es el realizado en el marco del Plan de Gestión Integral del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco (PGIHU), y que si bien reveló parámetros indicativos de un estado hipereutrófico en ciertas áreas, especialmente debido a concentraciones elevadas de fósforo total y baja transparencia del agua, presenta limitaciones importantes, como una insuficiente cobertura espacial y temporal, ya que se realizaron mediciones en un número reducido de puntos de muestreo y en un periodo acotado, lo que dificulta evaluar adecuadamente las variaciones espaciales y estacionales del estado trófico. También presenta limitaciones analíticas, debido a que algunos parámetros medidos resultaron estar por debajo del límite de detección de los equipos utilizados, reduciendo la precisión de las conclusiones. Junto con esto no se cuenta con una caracterización que permita identificar con claridad las fuentes y dinámicas de los nutrientes, así como las interacciones entre las presiones antrópicas y los procesos naturales del humedal.

La falta de información detallada y precisa sobre el estado trófico del humedal limita severamente la capacidad de diseñar e implementar medidas de conservación y control efectivas. Sin una evaluación técnica rigurosa, es difícil priorizar acciones para reducir las cargas de nutrientes, restaurar procesos ecológicos y mitigar los impactos de la actividad humana. Es en este contexto en el que, bajo el conocimiento de la importancia de una condición trófica adecuada para un cuerpo de agua de estas características, se identifica como problemática la escasez de antecedentes técnicos precisos sobre el estado trófico del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco, siendo esto un obstáculo en la determinación del grado de eutrofización de este cuerpo de agua costero; información clave para el diseño e implementación de medidas enfocadas en la conservación integral de este ecosistema, que controlen o reduzcan según sea el caso, el aporte de nutrientes.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar el estado trófico del humedal Laguna y Estero Catapilco, en la Región de Valparaíso como base para la elaboración de propuestas de gestión.

3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar física y químicamente el humedal urbano Laguna y Estero Catapilco.
- Determinar el estado trófico del humedal mediante el uso de los índices de estado trófico propuestos por Guía CONAMA (2004) y por Smith et al. (1999).
- Generar un conjunto de propuestas de control de eutrofización para el HU Laguna y Estero Catapilco.

4. Metodología

4.1. Caracterización física y química el cuerpo de agua.

4.1.1 Determinación de las variables a analizar.

Las variables analizadas para la caracterización del cuerpo de agua se determinaron a partir tanto de la “*Guía CONAMA para el establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas*”, como del “Índice de Estado Trófico (TSI) propuesto por Smith et al. (1999), en complemento de aquellas variables que aportan información útil sobre el contexto en que se produce el proceso de eutrofización de los cuerpos de agua.

De esta manera, para la evaluación trófica según “*Guía CONAMA para el establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas*”, los parámetros requeridos son Clorofila A; DBO₅; Concentración de Fósforo; Concentración de Nitrógeno; Productividad primaria y Transparencia. Mientras que para la evaluación según el Índice de Estado Trófico (TSI) propuesto por Smith et al. (1999), los parámetros requeridos son Fósforo total; Nitrógeno total; Clorofila A y Transparencia. Siendo por lo tanto utilizados aquellos parámetros que son compartidos por ambos instrumentos.

Las variables medidas y los instrumentos respectivamente utilizados se detallan en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1: Variables a evaluar y sus respectivos instrumentos de medición.

Variable	Unidad de medida	Equipo utilizado
pH	n/a	Tester de pH/TDS/Conductividad rango alto HI 98130
Temperatura	°C	Tester de pH/TDS/Conductividad rango alto HI 98130
Conductividad Eléctrica	mS	Tester de pH/TDS/Conductividad rango alto HI 98130
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	Tester de pH/TDS/Conductividad rango alto HI 98130
Penetración de luz	m	Disco Secchi
Nitratos	mg/L	Fotómetro multiparamétrico Hanna HI 83209
Nitritos	mg/L	Fotómetro multiparamétrico Hanna HI 83209
Fosfatos	mg/L	Fotómetro multiparamétrico Hanna HI 83209

Clorofila A	mg/L	Espectrofotómetro Jenway 6705 UV/Visible
Oxígeno Disuelto	mg/L	Oxímetro Hanna HI 98139

4.1.2 Determinación de la ubicación de los puntos de muestreo.

Se definieron siete puntos de muestreo con la intención de maximizar la representatividad de la caracterización, para esto, la ubicación de los siete puntos de muestreo se definió procurando la equidistancia entre ellos, con el propósito de abarcar toda la extensión del espejo de agua. De esta manera, la ecuación con la que se determinó la distancia lineal que separa los puntos de muestreos entre si se definió como:

$$D = \frac{L}{n - 1}$$

Donde:

D = Distancia o separación equidistante entre puntos.

L = Longitud lineal total del humedal.

n = Cantidad de puntos de muestreo.

Por lo tanto, considerando $n= 7$ y $L= 1886$ metros, la distancia entre los puntos de muestreo es de $D = 314,33$ metros. Estos puntos se ubicaron en la parte central del cuerpo de agua, alejados de las zonas perimetrales u orillas, donde la profundidad es menor y, por lo tanto, podrían presentar valores que no reflejen con precisión las características generales del humedal, localizándose en las ubicaciones graficadas en la figura 4.1:

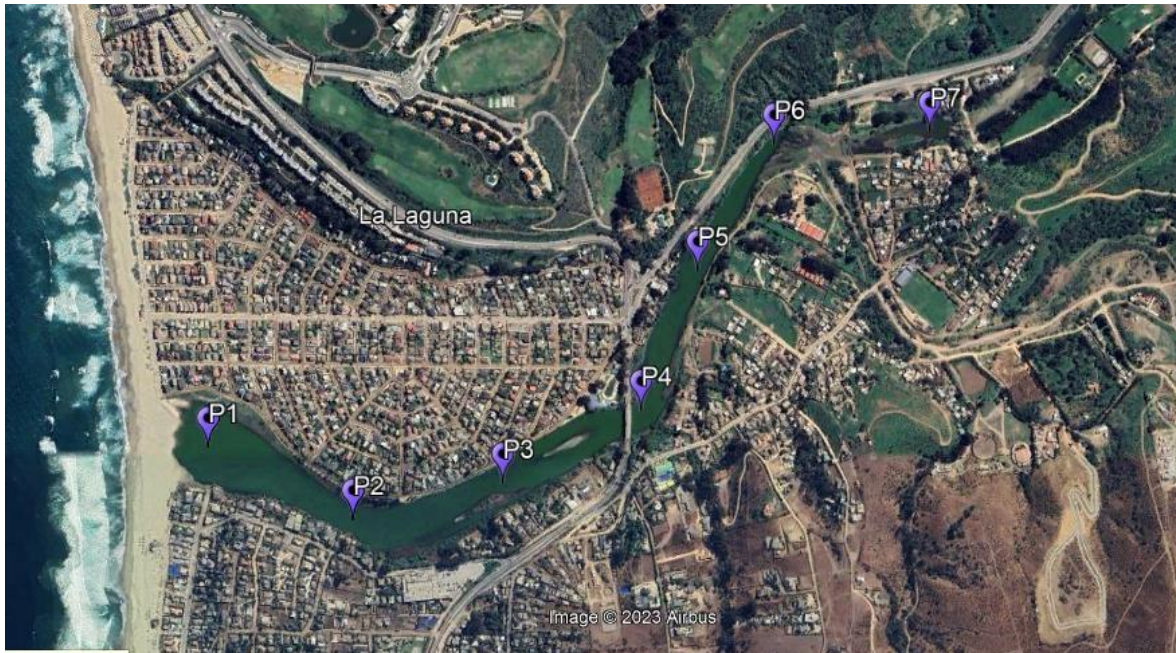


Figura 4.1: Ubicación de los puntos de muestreo. (Fuente: Elaboración propia).

Las coordenadas en el sistema UTM de los siete puntos de muestreo se detallan en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Coordenadas de los puntos de muestreo (UTM Datum WGS 84, Huso 19S).

Punto	Latitud Decimal	Longitud Decimal
P1	272163,122	6386919,135
P2	272448,498	6386785,191
P3	272738,432	6386862,598
P4	273004,430	6387010,016
P5	273108,332	6387283,441
P6	273251,382	6387532,568
P7	273554,038	6387563,638

Para una mejor comprensión de la dinámica de nutrientes del HU, se zonificó el cuerpo de agua en función del grado de urbanización que circunda al cuerpo de agua en dos sectores (Figura 4.2), una Zona de urbanización intensiva (ZUI), correspondiendo al sector más cercano a la costa, donde la cantidad de viviendas es numerosa tanto por el borde norte correspondiente a la comuna de Zapallar, como por el borde sur correspondiente a la comuna de Puchuncaví. El segundo sector definido es la Zona de urbanización moderada (ZUM), donde el número de viviendas al alejarse de la costa disminuye considerablemente por ambos bordes del cuerpo de agua.



Figura 4.2: División zonal en función del grado de urbanización (Fuente: Elaboración propia).

4.1.3 Toma de muestras y medición en terreno de las variables seleccionadas en los puntos definidos.

La toma de muestras y medición de variables se realizó en dos campañas contrastantes, una en otoño y otra en primavera. Para esto se solicitó previamente autorización vía correo electrónico a las instituciones implicadas de la administración y conservación del humedal, estas fueron la Municipalidad de Zapallar, Municipalidad de Puchuncaví y la OCB Chinchimén. Esto se realizó con la intención de realizar las actividades de monitoreo de manera oficial y de establecer comunicación directa y una red de información con quienes trabajan directamente con el humedal.

El ingreso al humedal se llevó a cabo por el extremo poniente de este, en kayak individual, procediendo a navegar longitudinalmente pasando por cada uno de los siete puntos previamente definidos, donde se tomaron dos muestras en botellas plásticas previamente lavadas con agua destilada y cebadas con agua del humedal; una botella de 1 L para el análisis de concentración de nutrientes en fotometría y otra muestra de 100 ml para el análisis de concentración de clorofila A, cuidando de almacenarlas inmediatamente en oscuridad. Junto con esto, en cada punto se procede a realizar las mediciones de las variables seleccionadas a través del uso de Multiparamétrico de pH/TDS/Conductividad rango alto (mod. Hanna HI 98130), oxímetro (mod. Hanna HI 98139) y disco Secchi graduado cada 5 cm. Finalmente se abandona la laguna por el mismo punto por donde se accedió, las muestras son almacenadas en oscuridad y baja temperatura con el objetivo de

prevenir alteraciones en las concentraciones contenidas en las muestras y son transportadas al laboratorio inmediatamente luego de la actividad para su posterior análisis de nutrientes y clorofila A.

Los resultados obtenidos de esta medición son fueron tabulados y categorizó la calidad de agua en cada punto en función de las clasificaciones establecidas por Hounslow (1995) y Davis et al., 2003, para pH (Tabla 4.3) y concentración de sólidos disueltos totales (Tabla 4.4) respectivamente.

Tabla 4.3: Clasificación de las aguas según valor de pH (Hounslow 1995).

Clasificación	Rango de pH
Fuertemente ácido	<4,0
Moderadamente ácido	4,0 - 6,5
Neutro	6,5 - 7,8
Moderadamente alcalino	7,8 - 9,0
Fuertemente alcalino	>9,0

Tabla 4.4: Clasificación de las aguas según concentración de sólidos totales disueltos (Davis et al., 2003).

Clasificación	Rango concentraciones (mg/L)
Dulce	< 1.000
Hiposalina	1.000 – 10.000
Salina	10.000 – 100.000
Hipersalina	> 100.000

4.1.4 Análisis de muestras en laboratorio.

El análisis de los parámetros seleccionados se realizó en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería en Medioambiente de la Universidad, por medio del uso del fotómetro multiparamétrico Hanna HI 83209 para nitrógeno y fósforo total, y del espectrofotómetro Jenway 6705 UV/Visible para el caso de la clorofila A.

4.1.4.1 Procedimiento para Nitrógeno total.

La cuantificación de la concentración de nitrógeno total en cada una de las muestras se obtuvo de la medición y suma de las concentraciones de nitrógeno en forma de nitratos (NO_3^-) y de nitritos (NO_2^-). Para la medición de nitrógeno en forma de nitrato se procedió según lo establecido en la sección "NITRATO" del manual de uso para el fotómetro HI83209 (*Instruction Manual HI 83209 Multiparameter Bench Photometer*, n.d.). De esta manera, se configuró inicialmente la concentración basal "cero" con un blanco de la muestra sin reactivo, para luego ingresar la capsula con 6 ml de la muestra con el reactivo para nitrato disuelto en ella (reactivo HI 93728-0) para finalmente dejar por un tiempo de exposición de 4,5 minutos, tiempo necesario para la fotometría de la muestra. El resultado de este proceso arroja la

concentración de nitrato en mg/L, por lo que para obtener la concentración de nitrógeno (N) a partir de esta, se utilizó la relación entre las masas molares del nitrato y del nitrógeno. De este modo, considerando que la masa molar del nitrato (NO_3^-) es 62 g/mol, y la masa molar del nitrógeno (N) es de aproximadamente 14 g/mol, para obtener los mg/L de nitrógeno a partir de los mg/L de nitrato:

$$\frac{\text{mg de N}}{L} = \frac{\text{mg de NO}_3^-}{L} \times \frac{14 \text{ g/mol}}{62 \text{ g/mol}}$$

Es decir, una relación de 1: 0,2258 mg/L entre nitrato y nitrógeno.

De igual manera se procedió para el nitrógeno en forma de nitrito, pero esta vez según lo establecido en la sección “NITRITO DE RANGO BAJO” del manual, cuyo rango de detección está entre los 0,00 y los 30 mg/L. De esta forma se configuró inicialmente la concentración basal “cero” con un blanco de la muestra sin reactivo, para luego ingresar la capsula con 10 ml de la muestra con el reactivo para nitrito “low range” disuelto en ella (reactivo HI 93707-0) para finalmente exponer la muestra por 6 minutos. Este resultado, al igual que el anterior se expresa en mg/L de nitrito (NO_2^-), por lo que, de igual manera se utilizó la relación entre las masas molares, esta vez entre nitrito (46 g/mol) y el nitrógeno:

$$\frac{\text{mg de N}}{L} = \frac{\text{mg de NO}_2^-}{L} \times \frac{14 \text{ g/mol}}{46 \text{ g/mol}}$$

Es decir, una relación de 1: 0,3043 mg/L entre nitrito y nitrógeno.

Obteniendo finalmente la concentración de nitrógeno total de la suma entre las concentraciones de nitrógeno obtenidas de la fracción nitrato y de la fracción nitrito para cada uno de los puntos de muestreo.

4.1.4.2 Procedimiento para Fósforo total.

Para la cuantificación del fósforo total en las muestras se hizo un análisis de la concentración de fosfato (PO_4^{3-}) en ellas. Para esto se desarrolló el procedimiento siguiendo lo establecido en la sección “FOSFATO DE RANGO BAJO” del manual, cuyo rango de detección está entre los 0,00 y los 2,5 mg/L. Se configuró inicialmente la concentración basal “cero” con un blanco de la muestra sin reactivo, para luego ingresar la capsula con 10 ml de la muestra con el reactivo para fosfato “low range” disuelto en ella (reactivo HI 93713-0), siendo esta procesada por 3 minutos. Este resultado, se expresa en mg/L de fosfato (PO_4^{3-}), por lo que, de igual manera que para el nitrógeno, se utilizó la relación entre las masas molares, aplicando para este caso las de fosfato y fósforo. De este modo, considerando que la masa molar del fosfato (PO_4^{3-}) es 95 g/mol, y la masa molar del fósforo (P) es de aproximadamente 31 g/mol, para obtener los mg/L de fósforo a partir de los mg/L de fosfato se calculó:

$$\frac{\text{mg de P}}{L} = \frac{\text{mg de PO}_4^{3-}}{L} \times \frac{31 \text{ g/mol}}{95 \text{ g/mol}}$$

Es decir, una relación de 1: 0.3263 mg/L entre fosfato y fósforo, obteniendo así la concentración de fósforo total para cada uno de los puntos de muestreo.

4.1.4.3 Procedimiento para Clorofila A.

Para determinar la concentración de clorofila A, se utilizó la metodología aplicada por Soto et al., (2011). Para las muestras obtenidas de cada punto de muestreo se filtraron 100 ml y se sumergieron en acetona (90% V/V) durante 20 horas en oscuridad y frío. La absorbancia del solvente se determinó a 630, 645 y 665 nm en un espectrofotómetro (mod. Jenway 6705 UV/Visible). La concentración de clorofila A se calculó a través del método de Richards y Thompson (1952):

$$\frac{\text{mg de chl - a}}{m^3} = \frac{(15,6 E665 - 2 E645 - 0,8 E630) * 10}{V}$$

Donde E665 es la absorbancia a 665 nm, E645 la absorbancia a 645 nm, E630 a 630 nm y V el volumen de la muestra filtrada (100 ml). Obteniendo de esta forma la concentración de clorofila A para cada uno de los puntos de muestreo.

4.1.5 Identificación y estimación de las fuentes de nutrientes.

Con la finalidad de generar una caracterización integral del estado trófico del humedal y las presiones a las que este está sometido en cuanto a la carga de nutrientes, se realizó una identificación de las fuentes de nutrientes basada en el documento “*Plan de Gestión Integral del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco*” generado por la I. Municipalidad de Zapallar en alianza con la Municipalidad de Puchuncaví y la OBC Chinchimén. Este documento constituye la información más completa y actualizada hasta la fecha sobre el HU. En complemento se realizaron visitas a terreno, consultas a expertos y a profesionales de las municipalidades involucradas (I. Municipalidad de Puchuncaví e I. Municipalidad de Zapallar), obteniendo así mayor detalle del contexto en que se inserta el HU y la dinámica a la que está sujeto.

Las cargas anuales de fósforo y nitrógeno se calcularon según la ecuación modificada de Ryding & Rast (1992) utilizada por Villalobos et al., (2003):

$$L = LT + LDS$$

Siendo:

L = carga total.

LT = carga anual de las entradas.
LDS = carga directa y difusa de las aguas residuales.

Para el cálculo de LT se utilizó:

$$LT_{[p,N]} = Q_1[P, N]_1 + Q_2[P, N]_2 + \dots + Q_n[P, N]_n$$

Donde:

LT [p, n]= Carga de fósforo o nitrógeno en $\mu\text{g}/\text{año}$.

Qn= Flujo anual de la entrada de afluentes.

[P, N]_n= La concentración de fósforo o nitrógeno del flujo correspondiente en la entrada.

Es necesario mencionar que, para el caso del objeto de estudio, este solo cuenta con un afluente, correspondiente al Estero Catapilco y cuyo caudal, por falta de bibliografía, se homologó con un curso de agua de características similares, en este caso, el estero Limache, cuyo caudal promedio según Córdova et al., (2009) es de 4,1 m³/s. En cuanto a las concentraciones de nitrógeno y fósforo utilizadas, estas reflejan la media entre las concentraciones obtenidas tanto en el muestreo de mayo 2023 como el de octubre 2024.

Mientras que para el cálculo de LDS se utilizó:

$$LDS_{[P,N]} = K * N * (1 - R_s)$$

Donde:

LDS [p,n]= El suministro artificial de fósforo o nitrógeno.

K= Constante, para fósforo K = 0,8 kg por persona/ año, mientras que para nitrógeno K = 3,8 kg persona/ año (Dillon & Rigler, 1974).

N= Número de habitantes.

R_s= Coeficiente de retención por tanque séptico según la capacidad de filtración del suelo. Brandes et al. (1974) calcularon un R_s estándar de 0,3.

Es necesario mencionar que el número de habitantes se estimó a través de fotointerpretación de imágenes satelitales del área de estudio, de lo que se desprendieron 221 viviendas dentro de los polígonos definidos por el PGIHU, en conjunto con el promedio de 3,1 personas por vivienda extraído del CENSO 2017 (INE, 2018). Además, para el promedio de días de uso de las viviendas se utilizó 365 días considerando el principio preventivo.

4.2. Determinación del estado trófico del cuerpo de agua.

Existe variedad de sistemas de clasificación trófica, entre los más destacados se encuentran

el índice de estado trófico de Carlson (1977), el índice propuesto por Willen (2000), Smith et al. (1999), Margalef (1983), la OCDE (1982) o bien, el de Lee, Jones & Rast (1982). Todos ellos establecen valores límite entre determinados niveles de estado trófico para las distintas variables causales y/o respuesta que tienen en cuenta, por lo que la evaluación del estado trófico puede diferir según el índice aplicado o el parámetro utilizado para valorarlo, por lo tanto, para un mismo valor de un indicador, se pueden obtener evaluaciones distintas, no existiendo, a fecha, una directriz estandarizada para la evaluación del estado trófico en todas las masas de agua (MTE Gob. de España, 2022).

La determinación del estado trófico del Humedal Urbano se efectuó a través de la aplicación de comparación de los valores obtenidos tanto en las mediciones de terreno, como en los análisis de laboratorio, con los rangos establecidos por la “*Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas*” y por el Índice de Estado Trófico de propuesto por Smith et al. (1999), para cada una de las campañas de monitoreo, de tal forma que se permita evidenciar la variación temporal del estado trófico del humedal.

Estos índices fueron escogidos bajo los siguientes criterios; Guía CONAMA es el único documento nacional que propone un instrumento evaluador del estado trófico para cuerpos de agua, mientras que el índice de Smith et al. (1999) es un índice utilizado repetidamente en evaluaciones tróficas de cuerpos de agua tanto a nivel nacional como internacional, siendo además el instrumento utilizado por la Municipalidad de Zapalla en la caracterización realizada para el Plan de Gestión Integral del HU Laguna y Estero Catapilco, por lo que facilita el contraste con estos antecedentes y la utilización de los resultados de este documento por parte de organismos del estado.

Cabe destacar que la guía CONAMA considera categorías entre el estado ultraoligotrófico y el mesotrófico, categorizando por defecto como estado eutrófico cualquier parámetro que sobrepase los límites de lo mesotrófico, mientras que el índice de Smith et al. (1999), establece categorías entre la oligotrofia hasta la Hipereutrofia.

4.2.1 Clasificación según Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas.

Se evaluó el estado trófico del Humedal Urbano por cada campaña de muestreo, en función de los parámetros y rangos establecidos por la “Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas”, (2004). De esta clasificación, se consideró la concentración de clorofila a, transparencia, concentración de fósforo y concentración de nitrógeno como indicativos de la condición trófica del cuerpo de agua. Si bien la concentración de nitrógeno total, según Pradenas (2021), no necesariamente conlleva al aumento de biomasa, se consideró para tener una visión más integral del estado trófico del cuerpo de agua.

En la Tabla 4.5 se indican las categorías establecidas rango de valores de los seis parámetros relativos al estado trófico que describe la guía CONAMA, 2004. Estas categorías se presentan ordenados de menor a mayor nivel trófico, es decir desde el estado ultraoligotrófico al mesotrófico, donde se asume que un valor superior a los correspondientes al estado mesotrófico, describen un estado eutrófico del cuerpo de agua. De esta manera, la calificación del humedal se realizó en relación con el valor obtenido en los parámetros considerados y el rango de valores en el cual se encuentran.

Tabla 4.5: Rangos establecidos por guía CONAMA para determinar estados tróficos en cuerpos lacustres. (Fuente: Modificado de Tabla 2 de Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas).

Variable	Unidad	Estado Ultraoligotrófico	Estado Oligotrófico	Estado Mesotrófico	Estado Eutrófico
Clorofila a	µg/L	<1	[1-3]	]3-15]	>15
DBO5	mg/L	<1	[1-5]	]5-20]	>20
Fósforo	µg/L	<7,5	]7,5-10]	]10-30]	>30
Nitrógeno	µg/L	<300	]300-450]	]450-750]	>750
Productividad Primaria	mg C/m ² año	<30	]30-80]	]80-250]	>250
Transparencia (disco Secchi)	m	>12	]12-6]	]6-3]	<3

4.2.2 Clasificación según Índice TSI de Smith et al. (1999).

También, se evaluó la condición trófica del Humedal Urbano por cada campaña de muestreo, empleando la clasificación indicada por Smith et al. (1999). Esta clasificación es la utilizada por la Municipalidad de Zapallar en la caracterización asociada al Plan Integrado de Gestión del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco, y considera la

concentración de clorofila a, sólidos disueltos, fósforo y nitrógeno totales dentro de sus parámetros como indicativo de la condición trófica. En la Tabla 4.6 se indica el rango de valores de los cuatro parámetros relativos al estado trófico que representa el índice de Smith et al. (1999), ordenados de menor a mayor, es decir desde el estado oligotrófico al hipereutrófico. De esta manera, la calificación del humedal, al igual que con la metodología anteriormente descrita, se realizó en relación con el valor obtenido del parámetro considerado y el rango de valores en el cual se encuentra.

Tabla 4.6: Rangos establecidos por Smith et al. (1999). Para la clasificación de estado trófico. (Fuente: Modificado de Pradenas, 2021).

Condición trófica	Fósforo total (µg/L)	Nitrógeno total (µg/L)	Clorofila a (µg/L)	SD (m)
Oligotrofia	<10	<350	<3,5	>4
Mesotrofia	[10 – 30]	[350 – 650]	[3,5 – 9]	2-4
Eutrofia	]30 – 100]	]650 – 1200]	]9 – 25]	1-2
Hipereutrofia	>100	>1200	>25	<1

4.3 Elaboración de propuestas de control.

La elaboración de propuestas que reduzcan o controlen el grado de eutrofización del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco se realizó en base a los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo. Es decir, se consideraron los datos obtenidos en la caracterización física y química del cuerpo de agua, la identificación de los principales aportes de nutrientes y la categorización zonal del estado trófico del humedal.

Estas propuestas buscan controlar las concentraciones de nutrientes promotores de los procesos de eutrofización en el cuerpo de agua (nitrógeno y fósforo) con la implementación de medidas que puedan ser llevadas a cabo por los actores involucrados en la conservación del Humedal Urbano.

Para la selección y diseño de las propuestas se realizó revisión bibliográfica en busca de sistemas de referencia de rápida acción, bajo costo y relativamente sencillas, que se acomoden a las características y necesidades del caso de estudio. Para finalmente realizar tres propuestas con sus respectivos objetivos, descripciones, monitoreos de seguimiento y la ubicación recomendada para cada medida.

5. Resultados

5.1 Resultados del Objetivo 1.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el proceso de caracterización del Humedal Urbano. Estos incluyen los resultados de los parámetros físicos y químicos obtenidos de las mediciones realizadas en terreno para ambas campañas; los resultados de las concentraciones de nutrientes y clorofila A derivados de los análisis en laboratorio para las muestras de ambas campañas; y los resultados de la estimación de las cargas de nutrientes que recibe el humedal, obtenidos del levantamiento de fuentes de nutrientes.

5.1.1 Toma de muestras y medición en terreno.

Los resultados de las mediciones realizadas en terreno tanto en la campaña de mayo 2023 como la de octubre 2024 se detallan en las tablas 5.1 y 5.3 respectivamente. Junto con esto se presenta la caracterización para cada punto de muestreo en función del pH registrado, según la clasificación establecida por Hounslow 1995 y en función de su salinidad según Davis et al., 2003 (Tabla 5.2 y 5.4).

Tabla 5.1: Valores de los parámetros medidos en terreno para muestreo de mayo 2023.

Zona	Analito/ Punto	T° [°C]	pH	E.C [mS]	SDT [mg/L]	Transparencia [m]	O.D [mg/L]
ZUI	P1	11,6	9,36	>LD20	>LD10000	0,25	n/a
	P2	12	9,47	>LD20	>LD10000	0,20	n/a
	P3	11,8	9,43	>LD20	>LD10000	0,23	n/a
	P4	11,9	9,44	>LD20	>LD10000	0,24	n/a
ZUM	P5	11,5	9,4	>LD20	>LD10000	0,26	n/a
	P6	12,4	9,42	>LD20	>LD10000	0,23	n/a
	P7	10,6	8,46	9,6	4810	0,25	n/a

Tabla 5.2: Caracterización de la calidad del agua en función de su pH y Salinidad para muestreo de mayo 2023.

Zona	Punto de muestreo	Clasificación pH según Hounslow 1995.	Clasificación SDT según Davis et al., 2003
ZUI	P1	Fuertemente alcalino	Salina
	P2	Fuertemente alcalino	Salina
	P3	Fuertemente alcalino	Salina
	P4	Fuertemente alcalino	Salina
ZUM	P5	Fuertemente alcalino	Salina
	P6	Fuertemente alcalino	Salina
	P7	Moderadamente alcalino	Hiposalina

Para la campaña desarrollada en mayo 2023, los valores de pH se clasificaron mayormente como fuertemente alcalinos en la Zona de Urbanización Intensiva (ZUI), con valores entre 9,36 (P1) y 9,47 (P2), mientras que en la Zona de Urbanización Moderada (ZUM), P7 presentó un pH moderadamente alcalino (8,46). Esto podría estar relacionado con descargas antropogénicas que incrementan la alcalinidad del agua, posiblemente provenientes de detergentes u otros compuestos químicos residuales.

En cuanto a Conductividad Eléctrica (E.C) y Sólidos Disueltos Totales (SDT), la ZUI presentó valores que superaron los límites de detección (>LD20 para E.C y >LD10000 mg/L para SDT). Este comportamiento es indicativo de una alta concentración de sales disueltas. Mientras que, en la ZUM, P7 presentó una menor salinidad (E.C = 9,6 mS; SDT = 4810 mg/L), lo que sugiere una disminución de la influencia de estas fuentes hacia áreas menos intervenidas.

La transparencia medida con disco Secchi fue consistentemente baja en todas las estaciones de muestreo (0,20 - 0,26 m). Estos valores reflejan una alta turbidez en el agua, atribuible a sólidos en suspensión, materia orgánica o proliferación de fitoplancton, elementos comunes en sistemas eutrofizados.

No se disponen valores medidos en esta campaña para el oxígeno disuelto debido a problemas con el equipo de medición. Sin embargo, la turbidez elevada y los altos valores de alcalinidad podrían influir negativamente en los niveles de oxígeno, afectando la biota acuática.

Tabla 5.3: Resultados de los parámetros medidos en terreno para muestreo del 3 de octubre 2024.

Zona	Analito/ Punto	T° [°C]	pH	E.C [mS]	SDT [mg/L]	Transparencia [m]	O.D [mg/L]
ZUI	P1	19,2	9,06	11,8	5940	1,15	7,32
	P2	19,1	9,07	11,5	5760	1,05	13,13
	P3	19,8	9,06	10,91	5440	1,25	8,04
	P4	19,8	8,98	10,36	5170	1,10	8,63
ZUM	P5	20,5	9	10,26	5140	1,10	9,12
	P6	22,1	8,6	12,9	1430	1,12	8,61
	P7	19,4	8,19	12,47	1230	1,11	9,59

Tabla 5.4: Caracterización de la calidad del agua en función de su pH y salinidad para muestreo del 3 de octubre 2024.

Zona	Punto de muestreo	Clasificación pH según Hounslow 1995.	Clasificación SDT según Davis et al., 2003
ZUI	P1	Fuertemente alcalino	Hiposalina
	P2	Fuertemente alcalino	Hiposalina
	P3	Fuertemente alcalino	Hiposalina
	P4	Moderadamente alcalino	Hiposalina
ZUM	P5	Moderadamente alcalino	Hiposalina
	P6	Moderadamente alcalino	Hiposalina
	P7	Moderadamente alcalino	Hiposalina

En la campaña de octubre de 2024 se obtuvo que la temperatura osciló entre 19,1 °C (P2) y 22,1 °C (P6), con valores más altos en la Zona de Urbanización Moderada (ZUM). Estas variaciones pueden atribuirse a la menor profundidad. La diferencia con la campaña anterior es consistente con el aumento de temperatura ambiental en primavera.

Los valores de pH se clasificaron mayoritariamente como fuertemente alcalinos en la Zona de Urbanización Intensiva (ZUI), con un rango de 8,98 a 9,06. En la ZUM, los valores disminuyeron a un rango moderadamente alcalino, con un mínimo de 8,19 en P7. Este patrón puede estar relacionado con la dilución y las condiciones naturales de mayor regeneración en la ZUM, frente a los aportes antropogénicos en la ZUI.

En la ZUI, los valores de E.C variaron entre 10,36 mS (P4) y 11,8 mS (P1), mientras que los SDT fluctuaron entre 5.170 mg/L (P4) y 5.940 mg/L (P1). Estos valores reflejan una elevada concentración de sales disueltas, posiblemente debido a aportes urbanos. Mientras que en la ZUM, la conductividad disminuyó significativamente, con un mínimo de 12,47 mS (P7).

La transparencia de agua presentó valores homogéneos en todo el humedal, oscilando entre 1,05 m (P2) y 1,25 m (P3). Estos valores son notablemente más altos que los registrados en la campaña de mayo 2023, indicando una menor turbidez, probablemente asociada a la dilución de la materia orgánica y material particulado luego de la temporada de lluvias.

Los niveles de oxígeno disuelto oscilaron entre 7,32 mg/L (P1) y 13,13 mg/L (P2), con valores más altos en la ZUI. Aunque estos niveles parecen adecuados, podrían estar influenciados por la fotosíntesis del fitoplancton durante el día, lo que explicaría las concentraciones elevadas en la superficie.

5.1.2 Análisis en laboratorio

Los resultados del análisis fotométrico de las muestras tomadas en la campaña de mayo

2023 se describen en las Tablas 5.5 y 5.6. Mientras que los resultados para la campaña de octubre 2024 se encuentran las Tablas 5.7 y 5.8.

Tabla 5.5: Valores de las concentraciones de nutrientes obtenidos del análisis fotométrico para el muestreo de mayo 2023.

Zona	Punto de muestreo	NO ₃ - [µg/L]	NO ₂ - [µg/L]	N total [µg/L]	PO ₄ ³⁻ [µg/L]	P total [µg/L]
ZUI	P1	3100,0	60,0	718,5	2400,0	782,73
	P2	0,0	60,0	18,3	2200,0	717,51
	P3	0,0	50,0	15,2	1800,0	587,05
	P4	0,0	120,0	36,5	700,0	228,30
ZUM	P5	2800,0	500,0	784,7	2400,0	782,73
	P6	0,0	50,0	15,2	0,0	0,00
	P7	400,0	30,0	99,5	2800,0	913,19

Tabla 5.6: Absorbancia y concentración de Clorofila A para el muestreo de mayo 2023.

Zona	Long. Onda (nm) / Punto	E665	E645	E630	Clorofila a [mg/m ³]
ZUI	P1	0,092	0,057	0,051	0,1280
	P2	0,052	0,017	0,02	0,0761
	P3	0,046	0,017	0,017	0,0670
	P4	0,036	0,013	0,013	0,0525
ZUM	P5	0,032	0,02	0,019	0,0444
	P6	0,015	0,009	0,009	0,0209
	P7	0,029	0,013	0,011	0,0418

Tabla 5.7: Valores de las concentraciones de nutrientes obtenidos del análisis fotométrico para el muestreo de octubre 2024.

Zona	Punto de muestreo	NO ₃ - [µg/L]	NO ₂ - [µg/L]	N total [µg/L]	PO ₄ ³⁻ [µg/L]	P total [µg/L]
ZUI	P1	1700,0	360,0	493,6	2270,0	740,34
	P2	200,0	170,0	96,9	80,0	26,09
	P3	350,0	900,0	353,1	520,0	169,59
	P4	1100,0	290,0	336,8	1000,0	326,14
ZUM	P5	700,0	330,0	258,6	90,0	29,35
	P6	0,0	200,0	60,9	70,0	22,83
	P7	0,0	210,0	63,9	280,0	91,32

Tabla 5.8: Absorbancia y concentración de Clorofila A para el muestreo de octubre 2024.

Zona	Long. Onda (nm) / Punto	E665	E645	E630	Clorofila a [mg/m ³]
ZUI	P1	0,025	0,023	0,022	0,0326
	P2	0,019	0,016	0,017	0,0251
	P3	0,009	0,005	0,006	0,0126
	P4	0,022	0,017	0,017	0,0296
ZUM	P5	0,018	0,015	0,017	0,0237
	P6	0,027	0,023	0,024	0,0356
	P7	0,035	0,032	0,035	0,0454

5.1.3 Identificación y estimación de las fuentes de nutrientes.

A partir del levantamiento de amenazas generado por la Municipalidad de Zapallar y publicado en el documento titulado Plan de Gestión Integral del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco (Photosíntesis, 2023), y complementado con visitas en terreno y consultas a funcionarios municipales se identificó que las principales fuentes de nutrientes corresponden a descargas o drenajes de las fosas sépticas correspondientes a las viviendas ubicadas en la riera del humedal (Figura 5.1).



Figura 5.1: Polígonos definidos como sectores de potencial descarga de aguas residuales en PGIHU Laguna y Estero Catapilco.

Las cargas anuales de fósforo y nitrógeno obtenidas de la ecuación modificada de Ryding & Rast (1992) utilizada por Villalobos et al., (2003) se expresan en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Carga de nitrógeno y fósforo total en HU Laguna y Estero Catapilco.

Nutriente	LT	LDS	L
Nitrógeno (kg/ año)	10563,61	1822,37	12385,98
Fósforo (kg/ año)	64940,37	383,66	65324,02

5.2. Resultados del Objetivo 2.

En las tablas 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 se entregan los resultados de la condición trófica para cada uno de los siete puntos de muestreo ubicados a lo largo del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco correspondientes a las campañas realizadas tanto el 30 de mayo de 2023, como el 3 de octubre de 2024. De esta manera, las tablas 5.10 y 5.11 desglosan los resultados de ambas campañas según los criterios establecidos en la Guía CONAMA para el establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, mientras que las tablas 5.12 y 5.13 exponen los resultados en función de los criterios establecidos por el índice de estado trófico propuesto por Smith et al. (1999). En las tablas es posible observar que el estado trófico varía según cada parámetro evaluado, por lo que es necesario describirlos de forma individual, de esta manera, clorofila A se presenta como un parámetro cuya condición es homogéneamente ultraoligotrófica-oligotrófica, con concentraciones que se encuentran lejanas de los límites máximos de sus respectivos rangos (1 µg/L en el caso de la Guía CONAMA y 3,5 µg/L en el caso del índice de Smith). En el caso del nitrógeno total, puede observarse que prepondera la condición ultraoligotrófica-oligotrófica en ambas campañas, a excepción de los puntos P1 y P5 que, en la campaña de mayo 2023 (Tablas 5.10 y 5.11) presentaron tendencia a la mesotrófia-eutrofia, y en la campaña de octubre 2024 (Tablas 5.12 y 5.13), junto con P3 y P4 tienden a la oligotrófia-mesotrófia. En cuanto al fósforo total, este presenta en la campaña de mayo 2023, concentraciones que superan ampliamente el valor considerado por ambos índices para la eutrofia (30 µg/L), por lo que podemos hablar de un estado hipereutrófico transversal a lo largo del humedal, con la excepción del punto P6 cuya concentración de fósforo arrojó cero µg/L, por lo que su categoría correspondería a la menor de cada índice. En la campaña de octubre 2024, mientras que los puntos P1, P3 y P4 mantienen concentraciones de fósforo de grado eutrófico-hipereutrófico, los puntos P2, P5, P6 y P7 presentan una disminución con tendencia mesotrófica-eutrófica. Por último, la transparencia medida a través del disco de Secchi arroja para la campaña de otoño 2023 un estado eutrófico con tendencia a la hipereutrófia, mientras que para la campaña de primavera 2024, los puntos presentan un estado eutrófico transversal a todo el humedal.

Tabla 5.10: Evaluación del estado trófico según Guía CONAMA para el establecimiento de las N.N.S.S. de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, para muestreo realizado el 30 de mayo 2023.

Zona	PUNTO DE CONTROL	Clorofila A (µg/L)		Nitrógeno Total (µg/L)		Fósforo Total (µg/L)		Transparencia (m)	
		Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
ZUI	P1	0,1280	Ultraoligotrófico	718,5	Mesotrófico	782,73	Eutrófico	0,25	Eutrófico
	P2	0,0761	Ultraoligotrófico	18,3	Ultraoligotrófico	717,51	Eutrófico	0,20	Eutrófico
	P3	0,0670	Ultraoligotrófico	15,2	Ultraoligotrófico	587,05	Eutrófico	0,23	Eutrófico
	P4	0,0525	Ultraoligotrófico	36,5	Ultraoligotrófico	228,30	Eutrófico	0,24	Eutrófico
ZUM	P5	0,0444	Ultraoligotrófico	784,7	Eutrófico	782,73	Eutrófico	0,26	Eutrófico
	P6	0,0209	Ultraoligotrófico	15,2	Ultraoligotrófico	0,00	Ultraoligotrófico	0,23	Eutrófico
	P7	0,0418	Ultraoligotrófico	99,5	Ultraoligotrófico	913,19	Eutrófico	0,51	Eutrófico

Tabla 5.11: Evaluación del estado trófico según índice propuesto por Smith et al. (1999), para muestreo realizado el 30 de mayo 2023.

Zona	PUNTO DE CONTROL	Clorofila A (µg/L)		Nitrógeno Total (µg/L)		Fósforo Total (µg/L)		Transparencia (m)	
		Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
ZUI	P1	0,1280	Oligotrófico	718,5	Eutrófico	782,73	Hipereutrófico	0,25	Hipereutrófico
	P2	0,0761	Oligotrófico	18,3	Oligotrófico	717,51	Hipereutrófico	0,20	Hipereutrófico
	P3	0,0670	Oligotrófico	15,2	Oligotrófico	587,05	Hipereutrófico	0,23	Hipereutrófico
	P4	0,0525	Oligotrófico	36,5	Oligotrófico	228,30	Hipereutrófico	0,24	Hipereutrófico
ZUM	P5	0,0444	Oligotrófico	784,7	Eutrófico	782,73	Hipereutrófico	0,26	Hipereutrófico
	P6	0,0209	Oligotrófico	15,2	Oligotrófico	0,00	Oligotrófico	0,23	Hipereutrófico
	P7	0,0418	Oligotrófico	99,5	Oligotrófico	913,19	Hipereutrófico	0,51	Hipereutrófico

Tabla 5.12: Evaluación del estado trófico según Guía CONAMA para el establecimiento de las N.N.S.S. de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, para muestreo realizado el 03 de octubre 2024.

Zona	PUNTO DE CONTROL	Clorofila A (µg/L)		Nitrógeno Total (µg/L)		Fósforo Total (µg/L)		Transparencia (m)	
		Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría
ZUI	P1	0,0326	Ultraoligotrófico	493,6	Mesotrófico	740,34	Eutrófico	1,15	Eutrófico
	P2	0,0251	Ultraoligotrófico	96,9	Ultraoligotrófico	26,09	Mesotrófico	1,05	Eutrófico
	P3	0,0126	Ultraoligotrófico	353,1	Oligotrófico	169,59	Eutrófico	1,25	Eutrófico
	P4	0,0296	Ultraoligotrófico	336,8	Oligotrófico	326,14	Eutrófico	1,10	Eutrófico
ZUM	P5	0,0237	Ultraoligotrófico	258,6	Ultraoligotrófico	29,35	Mesotrófico	1,10	Eutrófico
	P6	0,0356	Ultraoligotrófico	60,9	Ultraoligotrófico	22,83	Mesotrófico	1,12	Eutrófico
	P7	0,0454	Ultraoligotrófico	63,9	Ultraoligotrófico	91,32	Eutrófico	1,11	Eutrófico

Tabla 5.13: Evaluación del estado trófico según índice propuesto por Smith et al. (1999), para muestreo realizado el 03 de octubre 2024.

Zona	PUNTO DE CONTROL	Clorofila A ($\mu\text{g/L}$)		Nitrógeno Total ($\mu\text{g/L}$)		Fósforo Total ($\mu\text{g/L}$)		Transparencia (m)	
ZUI	P1	0,0326	Oligotrófico	493,6	Mesotrófico	740,34	Hipereutrófico	1,15	Eutrófico
	P2	0,0251	Oligotrófico	96,9	Oligotrófico	26,09	Mesotrófico	1,05	Eutrófico
	P3	0,0126	Oligotrófico	353,1	Mesotrófico	169,59	Hipereutrófico	1,25	Eutrófico
	P4	0,0296	Oligotrófico	336,8	Oligotrófico	326,14	Hipereutrófico	1,10	Eutrófico
ZUM	P5	0,0237	Oligotrófico	258,6	Oligotrófico	29,35	Mesotrófico	1,10	Eutrófico
	P6	0,0356	Oligotrófico	60,9	Oligotrófico	22,83	Mesotrófico	1,12	Eutrófico
	P7	0,0454	Oligotrófico	63,9	Oligotrófico	91,32	Eutrófico	1,11	Eutrófico

La conjugación de estos resultados parciales se presenta en la Tabla 5.14, donde se expresan las medias aritméticas de cada parámetro para ambas campañas, en función de los dos índices aplicados. De esta manera, se puede visualizar el grado de eutrofización a nivel general del cuerpo de agua en el tiempo y las diferencias entre los criterios de evaluación de los índices utilizados. Por lo tanto, para clorofila A, la tendencia ultraoligotrófica-oligotrófica es predominante en la totalidad del humedal urbano, la cual se mantiene en el tiempo; mismo resultado que el presentado por el nitrógeno total. Por otro lado, el fósforo total se posiciona como el parámetro con mayor grado de eutrofización, siendo este clasificado con el grado máximo en ambos criterios en ambas campañas, mientras que la transparencia que presenta una tendencia a la eutrófia-hipereutrófia en la campaña de mayo 2023, disminuye su grado de eutrofización para la campaña de octubre 2024 a eutrófica según ambos índices.

Tabla 5.14: Evaluación del estado trófico de los valores promedio según Guía CONAMA para el establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para aguas continentales superficiales y marinas, e índice propuesto por Smith et al. (1999), para ambas campañas de muestreo.

Variable	Muestreo 30 de mayo 2023			Muestreo 30 octubre 2024		
	Valor promedio	Guía CONAMA	Smith et al. (1999)	Valor promedio	Guía CONAMA	Smith et al. (1999)
Clorofila A ($\mu\text{g/L}$)	0,062	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	0,029	Ultraoligotrófico	Oligotrófico
Nitrógeno Total ($\mu\text{g/L}$)	241,1	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	237,7	Ultraoligotrófico	Oligotrófico
Fósforo Total ($\mu\text{g/L}$)	573,07	Eutrófico	Hipereutrófico	200,81	Eutrófico	Hipereutrófico
Transparencia (m)	0,235	Eutrófico	Hipereutrófico	1,13	Eutrófico	Eutrófico

5.3 Resultados del Objetivo 3.

De los resultados obtenidos en la caracterización se desprende el fósforo como el principal agente promotor de eutrofización en el cuerpo de agua, este proveniente tanto del curso

natural del estero Catapilco, como de la lixiviación de materia orgánica proveniente las fosas sépticas de los sectores residenciales aledaños al humedal. Con esto como base, se proponen medidas que apuntan directamente al control de las principales fuentes de nutrientes, con el objetivo de reducir las concentraciones de fósforo en el objeto de estudio, desencadenando una reducción en el estado trófico del humedal, restaurando su capacidad de prestar servicios ecosistémicos.

5.3.1 Humedal Artificial de *T. Angustifolia*.

5.3.1.1 Objetivo

Reducción de las concentraciones de fósforo en el caudal de ingreso al humedal con la construcción y operación de un humedal artificial enriquecido con *T. Angustifolia*.

5.3.1.2 Humedales Artificiales

Los humedales artificiales (HA) o Wetlands, son estanques superficiales construidos en la tierra en los que, de forma controlada, se reproducen los mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en el agua que ocurrirían en humedales naturales, a través de una serie de procesos físicos, biológicos y químicos.

Éstos se basan en la presencia de especies vegetales y microorganismos para su funcionamiento y no requieren de la adición de químicos. Su eficiencia es exponencial en el tiempo, esto significa que, una vez establecidas y adaptadas al medio, las especies vegetales (o plantas macrófitas) serán capaces de crecer y desarrollarse por sí solas.

Las capacidades específicas de las plantas macrófitas serán esenciales para el funcionamiento del sistema (MINAGRI & CONAF, 2018). Estas características hacen de estos sistemas, una opción relativamente sencilla y de bajo costo para el control biológico de la eutrofización.

5.3.1.3 Tipos de Humedales Artificiales

En términos generales, los humedales artificiales se clasifican de acuerdo a las características del flujo hidráulico en sus lechos. En los humedales de Flujo Superficial el agua circula por encima del lecho, entre los tallos de las plantas y expuesta al aire atmosférico. En los humedales de Flujo Subsuperficial (FS) el agua circula por debajo de la superficie del lecho, a través de los poros de este (MINAGRI & CONAF, 2018). Este último puede subdividirse en humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSS) y Vertical (VHSS).

Para la propuesta respectiva, se determinó que el tipo de HA más adecuado para la aplicación en el Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco sería un HA de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSS) (Figura 5.2), debido a que presenta características ventajosas sobre los otros dos tipos; facilitan el crecimiento de colonias de microorganismos, las cuales encuentran condiciones idóneas para su sustento en el lecho de grava, que tiene altas tasas de reacción y oxigenación. El medio poroso se mantiene saturado y el agua con

alta carga trófica entra y sale por los extremos del humedal, gracias a la pendiente de fondo que permite el flujo del agua por gravedad. Pueden tratar efluentes primarios, luego de un pre-tratamiento (fosa séptica, tanques imhoff), por lo que son adecuados para aguas con una mayor carga orgánica. Por último, si bien los humedales de Flujo Superficial (FS) conllevan un menor costo económico de construcción, son los que requieren una mayor superficie, mientras que los humedales de Flujo Subsuperficial Vertical (VHSS) son por el contrario, aquellos que requieren de una menor superficie pero conllevan el mayor costo, tanto en instalación como en mantenimiento, debido a que su construcción requiere de ingeniería más compleja asociada al sistema de distribución intermitente que exige el uso de unidades presurizadas (MINAGRI & CONAF, 2018). Por lo que los humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal conjugan de forma apropiada tanto la capacidad de depuración, como la disponibilidad de espacio y factibilidad económica.

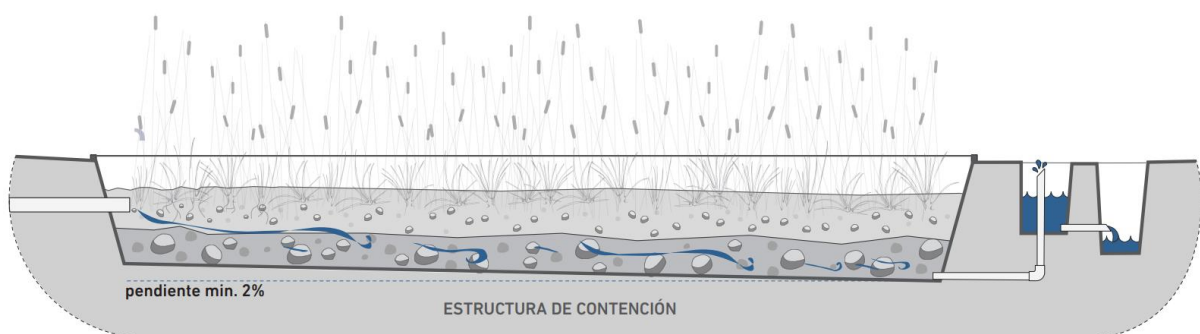


Figura 5.2: Esquema de HFSS. (Fuente: Guía de Soluciones Sanitarias Sustentables (MINAGRI & CONAF, 2018).

5.3.1.4 Diseño de HFSS

El diseño de un HFSS por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos son la caña común (*Phragmites australis*) o Tifáceas (*Typha spp.*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Kolb, P., 1998). El agua ingresa en forma permanente (flujo continuo) y es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior por rebalse. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través del medio poroso (flujo pistón).

La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5% a 2%. El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño. El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, de entre 3mm a 32mm. Es fundamental que el agua que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento, con lo que se evitan posibles problemas de olores y mosquitos (Parrao, 2018).

Según lo descrito por Correa-Torres et al., (2015), las condiciones hidráulicas óptimas del diseño de los bioreactores, con base en los análisis realizados, para el tratamiento con flujo subsuperficial de agua residual doméstica usando *P. australis* es el reactor con configuración largo:ancho de 4:1 usando grava como material filtrante. Este tipo de reactor contribuyó a mejorar el valor de TRH real, con una mejor eficiencia hidráulica y con la menor proporción de cortos circuitos y zonas muertas, en comparación con los demás bioreactores.

En los reactores con grava independiente de la configuración geométrica empleada, se presentó un crecimiento más pronunciado de la rizosfera (rizomas y raíces) e incremento proporcional de la longitud del tallo. Este desarrollo morfológico de los individuos de *P. australis* en agua residual doméstica establece una relación con la eficiencia hidráulica de los biorreactores. Los mayores porcentajes de remoción de fósforo, nitrógeno y sulfuros utilizando *P. australis* en agua residual doméstica se obtuvieron bajo las condiciones de geometría de 4:1 utilizando grava como sustrato en un tiempo hidráulico de 30 horas.

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004 en Delgadillo et al., 2010).

En la Tabla 5.15 se resumen las características de los tres géneros más utilizadas en los humedales artificiales.

Tabla 5.15: Taxas más utilizadas en sistemas de HA y sus principales características. (Fuente: Delgadillo et al., 2010).

Nombre científico	Familia	Distancia de siembra	Temperatura óptima °C	Salinidad ppt	pH
<i>Typha spp</i>	Tifácea	60 cm	10 - 30	30	4 - 10
<i>Scirpus spp</i>	Ciperácea	30 cm	18 - 27	20	4 - 9
<i>Phragmites spp</i>	Gramínea	60 cm	12 - 23	45	2 - 8

A partir de esto, se desprende que el género *Typha* es el que mejor se acomoda a las condiciones físicas y químicas del cuerpo de agua. En Chile, la especie *Typha angustifolia* se encuentra de manera nativa en las Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Valparaíso y desde la Región del Maule hasta la Región de Los Ríos, por lo que se puede asumir una buena adaptación al sitio de emplazamiento del HA.

Según los resultados obtenidos por Morocco & Paye, (2022), el tratamiento con *Typha angustifolia* en el contexto de humedales artificiales en un tiempo de retención de 10 días obtuvo una remoción de nitrógeno de 41.13% y para el parámetro de fósforo se experimentó

una remoción importante de 53.63%.

5.3.1.5 Ubicación recomendada para HFSS

La ubicación del HFSS (Figura 5.3) responde a la necesidad de disminuir la carga de fósforo que ingresa por el cauce del afluente, por lo que la implementación de esta medida se proyecta entre los puntos de muestreo P6 y P7, donde se dispone de un sector en altura que divide la masa de agua principal con el afluente, actuando como bypass entre estas dos masas de agua.

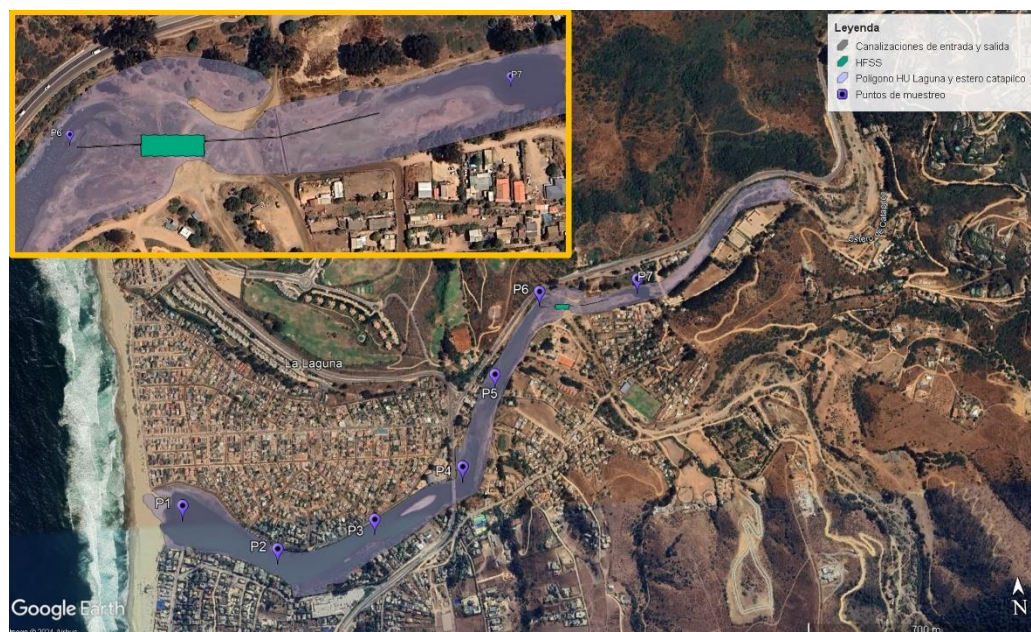


Figura 5.3: Ubicación general y puntual proyectada para HFSS (polígono verde).

5.3.1.6 Mantenimiento y seguimiento

Después de la primera estación de crecimiento se debe verificar que las plantas estén vivas. Si hay sitios dentro del humedal donde la densidad de plantas no haya alcanzado al menos 2 plantas/m² se debe replantar el humedal. En caso de que aparezcan otras plantas tales como ortigas, sauces o similares, deben ser removidas manualmente, procurando no afectar el sistema radicular de las plantas (MINAGRI & CONAF, 2018).

Para obtener un rendimiento óptimo se propone el reemplazo de la vegetación del HA luego de 10 días, este material debe ser dispuesto en un sitio de disposición final autorizado. Para evaluar la efectividad de la medida se propone la medición al décimo día, de las concentraciones de fósforo en el caudal de entrada al humedal y en el caudal de salida, comprobando así el porcentaje de remoción efectivo.

5.3.2 Biorrollos perimetrales con *T. Angustifolia*

5.3.2.1 Objetivo

Para la reducción de las concentraciones de nutrientes que actualmente tiene el cuerpo de agua se propone emplazar “Biorrollos” de la especie *Typha angustifolia* (Totorá), los cuales sirven como bioacumuladores de materia orgánica, con énfasis en nutrientes como el Fósforo y Nitrógeno, promotores de los procesos de eutrofización que degradan el humedal en cuestión.

5.3.2.2 Biorrollos

Los biorrollos, biofiltros o filtros vegetales son estructuras cilíndricas compuestas de una red arpillera de tela de yute de gran resistencia a la acción del agua, este material es biodegradable, muy compacto, con unas dimensiones que rondan los 30 centímetros de diámetro, está relleno con tierra, partes vegetales vivas (semillas, rizomas, plantas enteras) acompañados de restos vegetales muertos para darles volumen (ramas). Estos resultan útiles para resistir la acción erosiva del agua, protegiendo las orillas del desprendimiento de sedimento que da a parar al agua, y al ser enriquecido con vegetación de carácter fitoremediador, son capaces de reducir las concentraciones de nutrientes y elementos traza del ambiente. Su construcción es sencilla, rápida y de bajo costo (Carvajal, 2022).

5.3.2.3 Diseño de biorrollos

Estos se confeccionan en el mismo lugar donde se aplican, realizando un simple corte en la malla del rollo e insertando la especie seleccionada en el mismo. La instalación de los rollos de 10 metros de largo se realiza en las laderas, en líneas consecutivas de 100 metros, sujetándolos con estacas de madera.

Se seleccionó la especie *Typha angustifolia* para su implementación debido a su capacidad de retención de nutrientes (41.13% de nitrógeno y 53.63% de fósforo a los 10 días (Morocco & Paye, 2022)), tolerancia a mayores temperaturas, pH alcalino y velocidad de crecimiento. Esta es una planta acuática perenne, de la Familia Typhaceae que habita entre 0 y 1100 m.s.n.m. Su distribución incluye Argentina y Chile, en la I, V, VII y XI Región (Catálogo de Plantas Vasculares, 2018). Presenta una agregación basal de hojas planas emergentes que pueden alcanzar 2 (m) de altura, flores agrupadas en inflorescencias y raíces leñosas sumergidas, esta es considerada debido a su alta adaptabilidad a distintas condiciones ambientales, además de la gran capacidad que tiene esta especie de absorber nutrientes, destacando por sobre otras con relación al contenido de nitrógeno presente en hojas y raíces (Carvajal, 2022).

5.3.2.4 Ubicación recomendada para biorrollos

La ubicación de los biofiltros (Figura 5.4) busca disminuir las concentraciones de fósforo que son producto de la descarga directa o difusa de aguas residuales al cuerpo de agua.

Situación que se genera por la filtración de aguas residuales desde las áreas residenciales aledañas, por lo que la ubicación de los biofiltros responde a los sectores identificados por el PGIHU Laguna y Estero Catapilco como áreas de potencial descarga de aguas residuales.

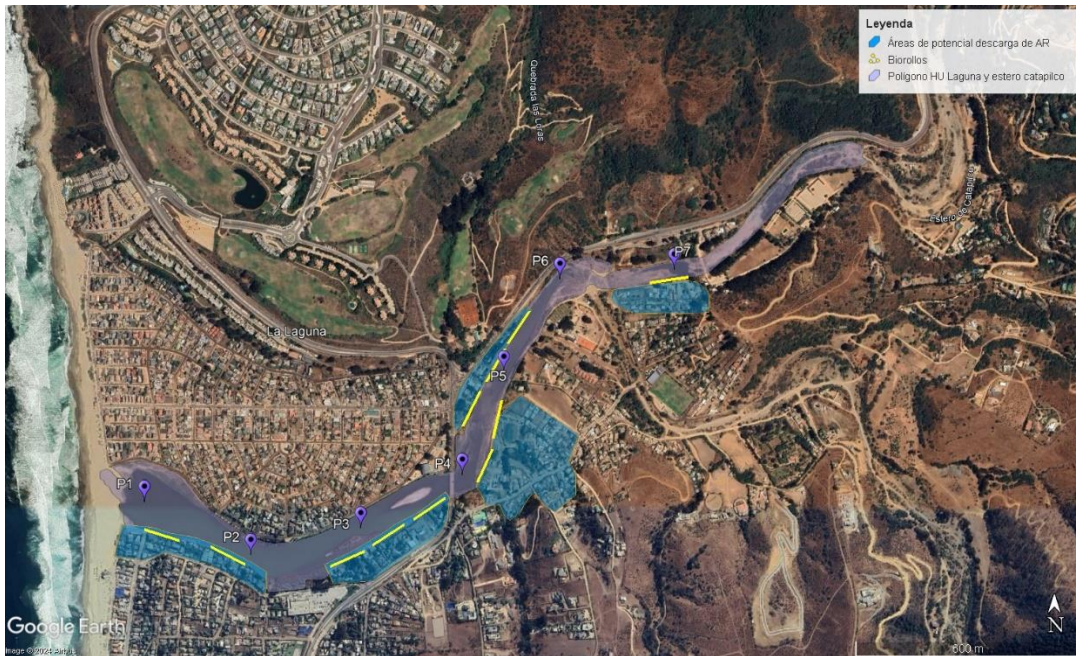


Figura 5.4: Ubicación recomendada para biofiltros (franjas amarillas).

5.3.2.5 Mantenimiento y seguimiento

Para el mantenimiento del sistema de biofiltros se requiere la revisión de la integridad de las estructuras junto con la remoción y reemplazo de las especies vegetales que en estos se desarrollan, para hacer disposición final de estos en un sitio autorizado.

Se recomienda implementar un protocolo de seguimiento y monitoreo que considere el análisis de parámetros físicos y químicos. Este monitoreo o seguimiento sistemático de la zona permite medir variables ambientales cuantitativas (mediciones de calidad de agua) y cualitativas (olores, estado trófico) en el tiempo, evaluando la eficacia de la medida aplicada, además de entender y relacionar la presión antrópica sobre estas componentes ambientales. A su vez, el monitoreo se transforma una herramienta para que los actores involucrados tomen decisiones e implementen medidas que hagan frente a los cambios negativos que se detecten.

6. Discusión

La evaluación del estado trófico del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco revela una situación compleja en términos de eutrofización, especialmente en relación con las elevadas concentraciones de fósforo, las variaciones en los niveles de nitrógeno y la baja transparencia en el agua. Los resultados obtenidos mediante el uso de la Guía CONAMA y el

Índice de Smith et al. (1999) muestran una concordancia en cuanto a la clasificación del humedal en un estado predominantemente eutrófico-hipereutrófico, aunque existen matices y diferencias entre ambos métodos que aportan una perspectiva integral y detallada sobre la calidad del agua en este ecosistema. La principal diferencia entre ambos índices se encuentra en que la Guía CONAMA permite clasificar de forma más precisa los grados más bajos de eutrofización al considerar la categoría ultraoligotrófico, mientras que el índice de Smith et al. (1999), permite clasificar los estados más avanzados de eutrofización al incorporar el grado hipereutrófico. Por lo tanto, al utilizar ambos índices, se amplía el abanico de categorías, facilitando una categorización más precisa del estado trófico real del cuerpo de agua evaluado.

En comparación con estudios anteriores del humedal, los datos obtenidos en esta investigación confirman el estado hipereutrófico del Humedal Laguna y Estero Catapilco, especialmente en cuanto a las concentraciones de fósforo. Estudios de monitoreo realizados en este mismo cuerpo de agua en 2022 indicaron una tendencia hacia la eutrofización debido a las actividades humanas en la cuenca. Sin embargo, fueron poco precisos en la aplicación de las técnicas de medición, por lo que este estudio profundiza en la caracterización y generación de información histórica sobre este humedal, por ejemplo, las variaciones estacionales y la variabilidad espacial del estado trófico. De esta manera es posible observar que las concentraciones varían notoriamente entre campañas, siendo menores en la campaña de primavera. Esto responde a que el régimen del estero Catapilco es netamente pluvial, lo que implica que mientras que el monitoreo de mayo 2023 (campaña de otoño) ocurrió luego de las estaciones secas y, por ende, menor volumen de agua en el humedal implicando una menor dilución de los nutrientes, la campaña de octubre 2024 ocurre luego de un invierno lluvioso, que, al aumentar el volumen de agua, reduce la concentración de los compuestos analizados. Es por esto que se pone en relevancia el seguimiento estacional de los parámetros tróficos y de las condiciones meteorológicas, con el fin de tener una comprensión integral de la dinámica de nutrientes que ocurre en este humedal urbano. Mientras que espacialmente se evidencia que las zonas más cercanas a la urbanización intensiva (ZUI) presentan un deterioro más marcado (puntos P1, P3 y P4), mientras que áreas menos urbanizadas como el sector de la zona de urbanización moderada (ZUM) tienden a mantener mejores condiciones.

Los valores de temperatura en el agua aumentaron significativamente entre ambas campañas (11,6-12,4 °C en mayo 2023 frente a 19,1-22,1 °C en octubre 2024). Este incremento está asociado al cambio estacional y la mayor exposición solar en primavera. Además, la temperatura más alta registrada en la Zona de Urbanización Moderada (ZUM) podría estar vinculada a la menor profundidad. El pH se mantuvo predominantemente en valores fuertemente alcalinos en la ZUI durante ambas campañas, con ligeras disminuciones en octubre 2024 (de 9,36-9,47 a 8,98-9,06). En la ZUM, los valores de pH fueron moderadamente alcalinos, destacando una mayor capacidad de amortiguación en estas zonas menos intervenidas. Estos resultados reflejan un aporte continuo de contaminantes urbanos en la ZUI, posiblemente derivados de detergentes y otras sustancias químicas.

Los valores de E.C y SDT en la ZUI se mantuvieron elevados en ambas campañas, evidenciando la presencia de sales disueltas y aportes antrópicos como descargas domésticas y agrícolas. Sin embargo, los valores de SDT disminuyeron en octubre 2024 (5.940 mg/L en P1 frente a >10.000 mg/L en mayo 2023), lo que podría deberse a un mayor efecto de dilución tras la temporada de lluvias. Mismo efecto en la transparencia medida con disco Secchi, que mostró un aumento significativo entre las campañas (0,20-0,26 m en mayo 2023 frente a 1,05-1,25 m en octubre 2024). La evolución temporal y espacial de los parámetros analizados reafirma la necesidad de priorizar acciones en la ZUI, donde los indicadores reflejan un impacto antropogénico más severo.

Las concentraciones de fósforo total obtenidas en otras caracterizaciones tróficas son variadas, ejemplos son la Laguna del Laja, región del Bío-Bío con 45,8 µg/L (enero 2019), el lago Icalma con 10 µg/L (enero 2019) según Urrutia & Pedreros, (2020); el lago Lanalhue con 104 µg/L (marzo 2020) según Pradenas, (2021); embalse Santomera, España con 90 µg/L (julio 2022) y embalse Anchuricas, España con 23 µg/L, ambos muestreados en julio 2022 (MTE Gob. de España, 2022), lo que resalta que las concentraciones resultantes de los muestreos en la Laguna Catapilco son sumamente altas y responden a una situación crítica de degradación por eutrofización.

A pesar del progreso realizado en este estudio, el estudio enfrenta limitaciones significativas. La falta de datos históricos detallados limita la capacidad de apreciar tendencias a largo plazo en la calidad del agua y la progresión de la eutrofización en el humedal urbano Laguna y Estero Catapilco. En este sentido, se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo para levantar sistemáticamente información sobre parámetros de calidad del agua como fósforo total, nitrógeno total, clorofila a y transparencia en las diferentes estaciones. La recopilación de datos a lo largo del tiempo permitirá realizar evaluaciones más precisas de la eficacia de los controles implementados y proporcionará información valiosa para ajustar las estrategias de conservación en función de los resultados obtenidos.

En resumen, Laguna y Estero Catapilco enfrentan serios desafíos debido a procesos de eutrofización. Sin embargo, los impactos negativos actuales pueden revertirse y mitigarse mediante la implementación de medidas de control, seguimiento y gestión adaptativas. Este trabajo requiere la colaboración entre diferentes actores locales y regionales en la implementación de estas medidas de conservación. Sólo mediante esfuerzos sostenidos y coordinados se podrá mantener la integridad ecológica de este humedal, protegiendo así sus valiosos servicios ecosistémicos y asegurando su sostenibilidad para las generaciones futuras.

7. Conclusión

Se realizó satisfactoriamente la caracterización tanto física y química, como de las condiciones tróficas o grado de eutrofización según los índices de Smith et al. (1999) y la Guía CONAMA para el establecimiento de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para el humedal urbano Laguna y Estero Catapilco. Generando a partir de esto, la proposición de medidas que combatan directamente los principales factores promotores de eutrofización que fueron identificados.

A través de la caracterización del humedal Laguna y Estero Catapilco por medio de dos campañas de muestreo (mayo 2023 y octubre 2024), se determinó que este cuerpo de agua se encuentra en un estado avanzado de eutrofización, principalmente respecto a las altas concentraciones de fósforo y la baja transparencia de agua que presenta el área estudiada. Estos factores se traducen en las condiciones ideales para que florezcan de forma desequilibrada algas plantas macrófitas. A medida que estos organismos se descomponen, agotan el oxígeno disuelto del agua y provocan una pérdida de claridad, lo que afecta negativamente la penetración de la luz para las capas profundas y promueve la acumulación de nutrientes en los sedimentos. Esto reduce la capacidad de la laguna para regularse, mantener su biodiversidad y otorgar servicios ecosistémicos.

En el caso del fósforo, las altas concentraciones son transversales a toda la extensión del humedal, presentando una tendencia eutrófica-hipereutrófica en ambos monitoreos. Mientras que la transparencia, al igual que el fósforo, presenta una condición de avanzada eutrofización a lo largo de todo el humedal, clasificada como eutrófica en ambos monitoreos. Por último, el nitrógeno no presenta concentraciones que se relacionen a un grado avanzado de eutrofización, pero caben destacar los puntos P1, P3 y P4 que presentan tendencia a la mesotrofia.

A través de la identificación de las fuentes de nutrientes, se identificó que las principales son la filtración de materia orgánica por tanques sépticos residenciales vecinos y los aportes que llegan por el curso natural del estero Catapilco. En particular, se ha demostrado que las zonas residenciales cercanas utilizan sistemas de descarga de aguas residuales mal controlados que son fuentes importantes de fósforo y nitrógeno. Este exceso de nutrientes afecta directamente el estado trófico de la laguna, acelerando los procesos de eutrofización.

Se propone para el control de estos procesos la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HFSS) en la parte alta del humedal y la implementación de biorrollos en las áreas de potencial descarga o filtración de aguas residuales, ambas con *Typha angustifolia* como especie activa. Estas medidas se presentan como soluciones efectivas y adecuadas para las características del objeto de estudio y pueden ser implementadas tanto en conjunto, como individual. Estas estructuras buscan reducir tanto, las cargas de nutrientes antes de que ingresen al sistema humedal, como las concentraciones de fósforo y nitrógeno que ya están presentes en el sistema.

8. Bibliografía

- BCN. (2020). *Ley 21202.- Modifica diversos cuerpos legales con el objetivo de proteger los humedales urbanos.*
- Carvajal, M. (2022). *Propuesta de actividades de restauración ecológica para la desembocadura del humedal urbano “Los Maitenes-Campiche”, comuna de Puchuncaví.*
- Córdova, S., Gaete, H., Aránguiz, F., & Figueroa, R. (2009). Evaluación de la calidad de las aguas del estero Limache (Chile central), mediante bioindicadores y bioensayos. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 37(2), 199–209. <https://doi.org/10.3856/vol37-issue2-fulltext-7>
- Correa-Torres, S. N., Gamarra, Y., Salazar, A. A., & Pitta, N. M. (2015). Evaluación de la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros en agua residual doméstica, utilizando phragmites australis en bioreactores. *Informacion Tecnologica*, 26(6), 89–98. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000600011>
- BCN. (2013). Decreto 19.- Establece normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales del Lago Villarrica. In *Decreto* (19; Vol. 19). MEDIO.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.*
- Di Castri, F., & Hajek, E. R. (1976). *BIOCLIMATOLOGIA DE CHILE. Entrega de resultados definitivos CENSO 2017.* (2018).
- Instruction Manual HI 83209 Multiparameter Bench Photometer.* (n.d.). Hanna Instruments.
- Medina, J., Osuna-Martínez, C. C., Padilla-Arredondo, G., Frías-Espéricueta, M. G., Barraza Guardado, R. H., León-Cañedo, J. A., & Arreola-Lizárraga, J. A. (2022). Trophic state, nutrient dynamics and net metabolism of a subtropical coastal lagoon (Gulf of California) receiving wastewater. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 38, 429–443. <https://doi.org/10.20937/RICA.54396>
- Merizalde, D. (2020). *IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES, PROBLEMÁTICA EN EL PERÚ Y ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.* Universidad Científica del Sur.
- MINAGRI, & CONAF. (2018). *Sistemas de saneamiento y reutilización Humedales Artificiales.*
- MMA. (2023). *Guía para la elaboración de planes de gestión integral de humedales y sus cuencas aportantes.*
- Morocco, S., & Paye, K. (2022). *Efecto de Typha angustifolia L. (Totora) y Phragmites australis (carrizo) en la remoción de nutrientes en la planta de tratamiento de agua residual.*
- MTE Gob. de España. (2022). *EVALUACIÓN DEL ESTADOTRÓFICO EN EMBALSE DE LA*

CUENCA DEL SEGURA.

- Parrao, L. (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS*. <https://hdl.handle.net/11673/47123>
- Photosíntesis. (2023). *Plan de Gestión Integral del Humedal Urbano Laguna y Estero Catapilco*.
- Pradenas, M. (2021). *EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO Y DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGA ACTUAL Y CARGA CRÍTICA DEL LAGO LANALHUE* *Habilitación presentada para optar al título de*. Universidad de Concepción.
- Ramsar, M. (2010). *Inventario de humedales Manual 15*.
- Soto, P., Gaete, H., & Hidalgo, M. E. (2011). Evaluación de la actividad de la catalasa, peroxidación lipídica, clorofila-a y tasa de crecimiento en la alga verde de agua dulce *Pseudokirchneriella subcapitata* expuesta a cobre y zinc. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 39(2), 280–285. <https://doi.org/10.3856/vol39-issue2-fulltext-9>
- Urrutia, R., & Pedreros, P. (2020). *EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LOS LAGOS ICALMA, GALLETUÉ Y LAJA*.
- Villalobos, L., Parra, O., Grandjean, M., Jaque, E., Woelfl, S., & Campos, & H. (2003). A study of the river basins and limnology of five humic lakes on Chiloé Island Estudio de la cuenca y limnología en cinco lagos húmicos de la Isla Chiloé. In *Historia Natural* (Vol. 76).
- Zouiten, H. (2012). *Análisis mediante modelado avanzado de procesos de eutrofización en lagunas litorales: aplicación a masas de agua atlánticas y mediterráneas*. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.