



Las causas de la crisis de contaminación en la cuenca del lago Vichuquén y el estuario de Llico y sus posibles soluciones



Johnnie Chamberlin, Ph.D

Fernanda Salinas, Ph.D

Megan Egler, Ph.D

26 de mayo del 2026

Las causas de la crisis de contaminación en la cuenca del lago Vichuquén y el estuario de Llico y sus posibles soluciones

26 de mayo del 2026

Descripción de las imágenes de la página anterior:

Arriba a la izquierda: Mapa de las pérdidas recientes de cobertura forestal como consecuencia de la actividad forestal en la zona.

Arriba a la derecha: Imagen satelital que muestra grandes cantidades de sedimento entrando al sistema lacustre e ingresando a la costa.

Abajo a la izquierda: Imagen satelital que muestra el cierre artificial de la desembocadura del estuario, con grandes cantidades de algas aguas arriba.

Abajo a la derecha: Imagen satelital que ilustra el desarrollo inmobiliario a la orilla del lago.

Tabla de Contenido

1	Descripción general	3
2	Resumen ejecutivo	4
3	Antecedentes históricos del complejo lacustre Vichuquén	5
4	Causas y factores determinantes de la contaminación actual en la cuenca del lago Vichuquén y el estuario de Llico	11
4.1	Deforestación y plantaciones forestales exóticas	11
4.1.1	Historia y alcance	11
4.1.2	Nutrientes y sedimentos	13
4.1.3	Volumen de escorrentía y caudales estivales	16
4.2	Agricultura / Pastizales	17
4.3	Urbanización, aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas residuales	19
4.4	Cierre artificial del estuario	21
4.5	El tsunami de 2010 y otras intrusiones de agua salada	24
4.6	Sequía	25
5	Cómo interactúan estos factores y contribuyen a las proliferaciones de algas y a los problemas de calidad del agua	26
6	Opciones para la mejora de la calidad del agua y la restauración de lagos	28
6.1	Evitar que los nutrientes entren en el lago	28
6.1.1	Estudios de nutrientes	28
6.1.2	Reforestación con especies forestales nativas, prácticas forestales mejoradas y minimización del uso de fertilizantes	29
6.1.3	Implementar y ampliar las franjas de amortiguación de los arroyos	30
6.1.4	Mejora de la gestión y el tratamiento de las aguas residuales	31
6.2	Eliminación y remediación de nutrientes en el lago	32
6.2.1	Aireación / Oxigenación	32
6.2.2	Aditivos para el control de nutrientes	33
6.2.3	Dragado	36
6.2.4	Restauración y mejora de humedales, y humedales artificiales	36
6.3	Gestión del nivel del lago	37
6.4	Orientación directa a algas / cianobacterias	38
6.4.1	Ultrasonificación	38
6.4.2	Alguicidas	40
7	El costo económico de la inacción	40

1 Descripción general

Los cuerpos de agua en la cuenca del lago Vichuquén y del estuario de Llico experimentan múltiples problemas interconectados de calidad del agua. En este contexto, las floraciones algales nocivas (FAN) y los patógenos transmitidos por el agua son motivo de gran preocupación debido a sus impactos en la salud humana y animal, así como en las actividades recreativas. Las FAN no pueden producirse sin la presencia de nutrientes. Las principales fuentes de estos nutrientes en la cuenca son la erosión del suelo, la escorrentía proveniente de tierras agrícolas y pastizales, los fertilizantes y las aguas residuales no tratadas o insuficientemente tratadas. Las aguas residuales sin tratar, la escorrentía de los pastizales y el ganado y otros animales pueden constituir fuentes de patógenos transmitidos por el agua en lagos y arroyos. Si bien los nutrientes son la causa principal de las FAN, diversos factores pueden contribuir a la concentración y disponibilidad de nutrientes en cuerpos de agua como el lago Vichuquén. La figura que se presenta a continuación ilustra algunos de los factores clave y las interconexiones que propician la aparición de FAN y las altas concentraciones de patógenos transmitidos por el agua en la cuenca. Este informe detalla las causas y los factores determinantes de los problemas de calidad del agua en la cuenca, y describe diversas opciones para su mejora y restauración.

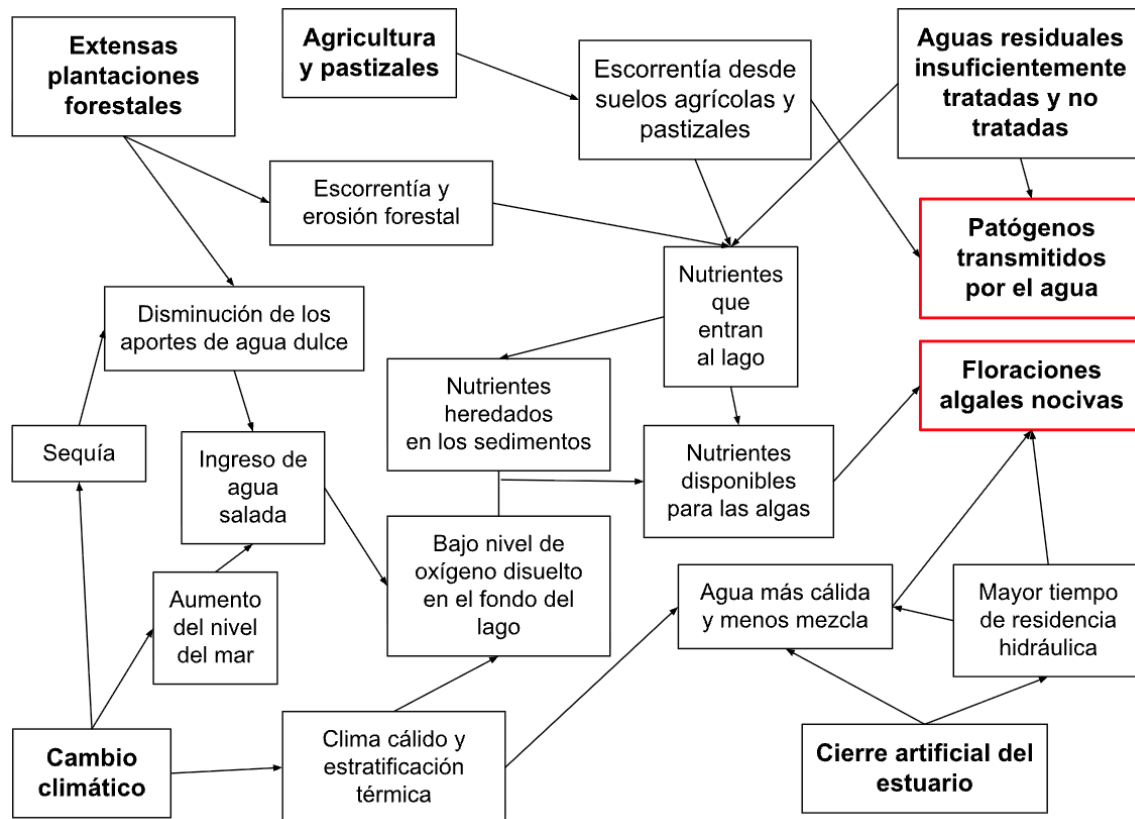


Figura 1. Diagrama de los factores clave y las relaciones que contribuyen a los problemas de calidad del agua en el sistema lacustre. Elaboración propia.

2 Resumen ejecutivo

La calidad del agua en el estuario de Llico, la laguna Torca y el lago Vichuquén («el complejo lacustre») se ha deteriorado en las últimas décadas, lo que ha contribuido a múltiples floraciones algales tóxicas, derivando en restricciones para el uso del lago Vichuquén y generando fuertes impactos en la vida silvestre y en los medios de vida locales. Si bien existen múltiples factores que contribuyen al declive de la calidad del agua en la cuenca —algunos de origen natural y otros antropogénicos—, la causa principal de las floraciones algales tóxicas es la alta concentración y disponibilidad de nutrientes —principalmente fósforo y nitrógeno— que ingresan y que han ingresado al complejo lacustre y que son liberados desde sus sedimentos. Las actividades forestales y agrícolas en la cuenca aportan grandes cantidades de nutrientes al complejo lacustre mediante el uso de fertilizantes y la aplicación de prácticas que provocan la erosión del suelo y el transporte de sedimentos ricos en nutrientes hacia el interior del sistema lacustre. Otra fuente de nutrientes y de patógenos potencialmente nocivos que ingresa a los cursos de agua locales son las aguas residuales no tratadas o insuficientemente tratadas. Con el paso del tiempo, estos nutrientes se han acumulado en los sedimentos del lecho lacustre, desde donde pueden ser liberados o resuspendidos bajo ciertas condiciones. Las sequías, los cierres artificiales del estuario y la disminución de la escorrentía provocada por las plantaciones forestales pueden aumentar los tiempos de residencia y las concentraciones de nutrientes en el lago al reducir su descarga hacia el océano, lo cual propicia las condiciones que desencadenan las floraciones algales. Por otra parte, los grandes ingresos de agua salada al lago Vichuquén pueden generar condiciones fisicoquímicas que favorecen la liberación de nutrientes desde los sedimentos del lecho hacia la columna de agua, donde estos quedan disponibles para las algas y las cianobacterias. Para mejorar la calidad del agua en el lago Vichuquén y en el resto del complejo lacustre, es necesario reducir drásticamente los aportes de nutrientes y eliminar, o neutralizar de algún otro modo, los nutrientes acumulados históricamente en los sedimentos del lago. Asimismo, favorecer el recambio del agua y la circulación permitiría mantener un sistema en mejores condiciones ambientales. Al incrementar los aportes de agua dulce al lago mediante la reconversión de las plantaciones forestales exóticas hacia vegetación nativa se podría mejorar la calidad del agua, al reducir el ingreso de sedimentos y favorecer el arrastre de nutrientes hacia la costa. Asimismo, permitir el desagüe natural del lago al mar, así como el ingreso ocasional de agua de mar durante las tormentas o las mareas altas, contribuiría al recambio hídrico del sistema lacustre. Un estudio detallado de los nutrientes y de la hidrodinámica a escala de toda la cuenca contribuiría a orientar estos esfuerzos y a priorizar las diversas fuentes de contaminación. Otras medidas adicionales, tales como la aireación, la restauración del hábitat, el uso de aditivos para el control de nutrientes y la construcción de humedales de tratamiento, podrían contribuir aún más a mejorar la calidad del agua. Este informe detalla las principales causas y factores determinantes de la contaminación actual en el complejo lacustre, el papel que desempeñan las distintas fuentes de contaminación en el

desencadenamiento de la actual crisis ecológica y sanitaria, así como las opciones disponibles para mejorar la calidad del agua y restaurar el sistema lacustre.

3 Antecedentes históricos del complejo lacustre Vichuquén

El complejo lacustre Vichuquén está integrado por el lago Vichuquén, las lagunas Torca, Dulce y Tilicura y el estero de Llico (Fig. 2).¹ El Estero Vichuquén, los arroyos Concavén, Uraco y Las Cardillas aportan agua al complejo, así como las quebradas que conforman afluentes secundarios en los períodos de lluvia.²



Figura 2. Imagen satelital de Google Earth del 30 de octubre del 2023 en la que se identifica el Lago Vichuquén, la Laguna Torca, la Laguna Agua Dulce, la Laguna Tilicura y el Estero Llico. Elaboración propia.

¹ EULA. 2008. Evaluación limnológica general del Lago Vichuquén. Condición de Invierno 2008. Universidad de Concepción. Centro de Ciencias Ambientales EULA 7 Laboratorio de Biodiversidad y Conservación de Recursos Acuáticos.

² Dirección de Obras Portuarias- GHD. 2016. Análisis Desembocadura Estero Llico, comuna de Vichuquén, Región del Maule. Informe de Etapa 1 Rev C.

El lago Vichuquén es una albúfera.³ Las albúferas son lagunas litorales, cercanas al nivel del mar, de agua salina o ligeramente salobre, separadas del mar por una lengua o cordón de arenas. Abate Molina, en 1782,⁴ señalaba que la sal común se encontraba *“bella y ya hecha”* en los vastos estuarios o lagos de Bucalemu, Boyeruca y Vichuquén, donde cada año se cristaliza espontáneamente, *“en tanta cantidad, que podrían cargarse con ella muchos barcos.”*⁵ Comentaba que la recolección es mínima, y que el resto se disolvía con las lluvias de invierno.⁶ Según relata Pedreros et al. (2019) en su reconstrucción histórica del Lago Vichuquén,⁷ en 1855 se consideraba convertir al lago en un apostadero naval, y se describe que **el Estero de Llico contaba con un ancho de entre 45 y 121 metros en media marea, y una profundidad de entre 3,5 y 4,5 metros. Posteriormente, la expedición de 1872, identifica al lago como “un gran charco salado” (Fig. 3), comunicado con el mar “por un canalizo somero” de entre uno y dos metros de profundidad en la mayor parte del cauce, y en el sector de El Rodeo se reducían a 0,5 o 0,7 metros de profundidad, 7.800 metros de largo y un ancho medio de 100 metros, con bancos de arena y fango.**

³ Pedreros, P.C., F. Torrejón, D. Álvarez & R. Urrutia. 2019. Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales. *Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña*, 9(1):149-177.

⁴ Molina, J.I. 1810. Ensayo sobre la Historia Natural de Chile. Bolonia. 18 de Noviembre 1986. Ediciones Maule.

⁵ Molina, 1810.

⁶ Molina, 1810.

⁷ Pedreros, P.C., F. Torrejón, D. Álvarez & R. Urrutia. 2019. Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales. *Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña*, 9(1):149-177.

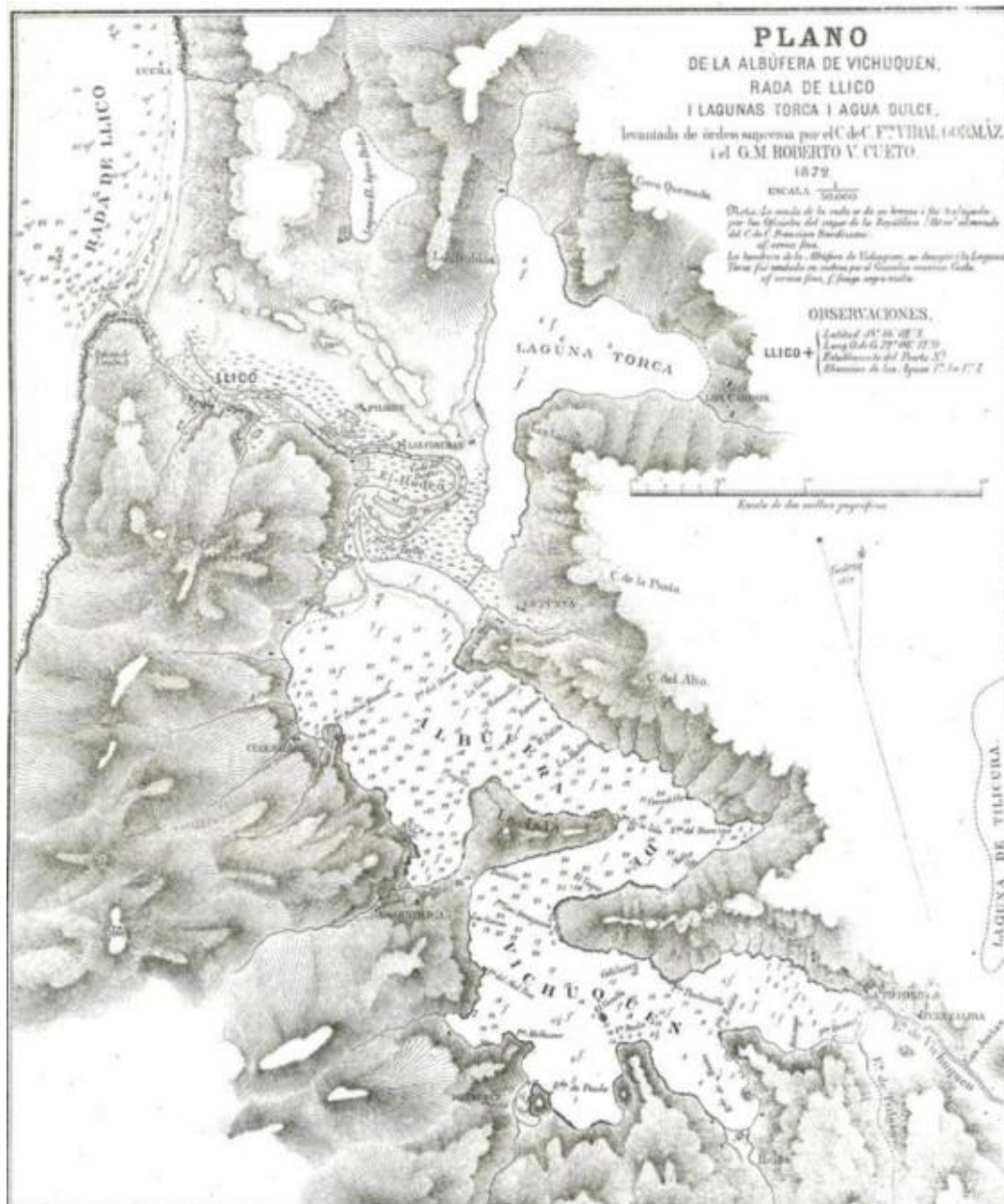


Figura 3. Mapa histórico “Plano de la albufera de Vichuquén, Rada de Llico i lagunas Torca i Agua Dulce, levantado de orden suprema por el C. de C. Fco. Vidal Gormaz i el G. M. Roberto V. Cueto. 1872. Fuente: Vidal Gormaz, 1873. Citado en: Pedreros et al. (2019).

Vidal Gormaz (1873), describía lanchas y canoas pescadoras entre las embarcaciones menores del tráfico de la rada y la albufera.⁸ Sin embargo, hacia mediados del s. XIX el depósito de

⁸ Vidal Gormaz, 1873. Citado en: Pedreros, P.C., F. Torrejón, D. Álvarez & R. Urrutia. 2019. Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales. *Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña*, 9(1):149-177.

arenas transportadas por las aguas del mar en el canal de entrada habrían hecho disminuir la marea en la entrada y la velocidad de las corrientes, aunque en la década de 1870 las mareas locales aún causaban una fluctuación leve y natural del nivel del lago.⁹ En enero de 1890 el desagüe se encontraba obstruido por las arenas desde hacía varios meses, y se registra un gradiente de salinidad en el lago que incrementa hacia el océano.¹⁰

A fines del siglo XIX se describía el lago Vichuquén con aguas algo salobres, donde abundan peces, mariscos y diversas aves, rodeados por márgenes en altura, cubiertos por árboles, desde los que descendían pequeñas corrientes de agua al lago.¹¹ Durante el siglo XIX en el lago abundaba la pocha, bagre grande, pejerrey chileno, pejerrey de mar, lisa, roncador y róbalo.¹² Se relata que en invierno, los lugareños abrían un pequeño canal artificial para desaguar el sur de laguna Torca hacia el lago Vichuquén, con el fin de evitar las inundaciones del campo vecino. La laguna Torca tenía aguas transparentes, con el fondo casi cubierto por *Potamogeton aff. lucens*, y las riberas cubiertas por un angosto pajonal de ciperáceas, albergando gran diversidad de aves acuáticas.¹³

Las primeras intervenciones significativas en el paisaje que rodea al complejo lacustre Vichuquén contribuyeron al aumento de la sedimentación al despejar suelos para las faenas agrícolas y ganaderas. A fines del siglo XIX se intensificó el cultivo de trigo para la exportación y la explotación masiva de hualo para la construcción, elaboración de durmientes de ferrocarril, leña y carbón, cambiando la fisonomía del paisaje natural y alterando los bosques de roble, roble blanco del Maule y hualo del entorno del lago Vichuquén, quedando solo remanentes de bosque en las quebradas, intensificando procesos erosivos y de sedimentación hacia el lago.¹⁴ Desde la década de 1930 las riberas del lago Vichuquén se transformaron en sitios de veraneo, reemplazando las plantaciones de pino. Durante la década de 1960 se intensificó uso de las riberas para la construcción de segundas viviendas, turismo y recreación hasta casi la totalidad de las riberas del lago, y con ello, también incrementó el aporte de nutrientes al lago generados por el vertido de aguas residuales domésticas y la erosión, deteriorando el estado trófico del lago.

Durante el siglo XX se introdujeron especies exóticas al lago, como el pejerrey argentino, las truchas, la carpa, gambusia, tenca y caracino, impactando la abundancia y riqueza de las

⁹ Pedreros et al. 2019.

¹⁰ Pedreros et al. 2019.

¹¹ Solano Asta-Buruaga, *Diccionario Geográfico de la República de Chile*, 879. Citado en: Pedreros et al. (2019).

¹² Pedreros et al. 2019.

¹³ Pedreros et al. 2019.

¹⁴ Pedreros et al. 2019.

especies nativas. A mediados del siglo XX se establecieron plantaciones de *Pinus radiata* en las laderas. Hasta 1975 aún quedaban remanentes de bosque esclerófilo con boldo, litre, molle y maitén en las lomas bajas que rodeaban el lago, que hoy han desaparecido casi por completo.¹⁵ El tsunami del año 2010, tras el terremoto, habría causado una entrada importante de agua salada al lago Vichuquén, incrementando brevemente su cota en 40 cm y dejando una fina capa de arena en el fondo del lago.¹⁶

Como puede apreciarse en las imágenes satelitales disponibles en Google Earth, al menos hasta el 12 de noviembre del año 2014, las fluctuaciones de mareas continuaron aportando agua de mar periódicamente al sistema lacustre. De manera natural, la conexión entre la desembocadura y el océano se cerraba por la arena en la época estival y en condiciones de tormenta, el fuerte oleaje permite el intercambio de agua entre el estero y el océano (Fig. 4).¹⁷ Sin embargo, en los últimos años se ha impedido el intercambio de agua entre el océano y el estero mediante la formación de una barra de arena acumulada con maquinaria pesada, bloqueando el flujo del agua (Fig. 4).

¹⁵ Pedreros et al. 2019.

¹⁶ Pedreros et al. 2019.

¹⁷ Dirección de Obras Portuarias-GHD. 2016. Análisis Desembocadura Estero Llico, comuna de Vichuquén, Región del Maule. Informe de Etapa 1 Rev C.

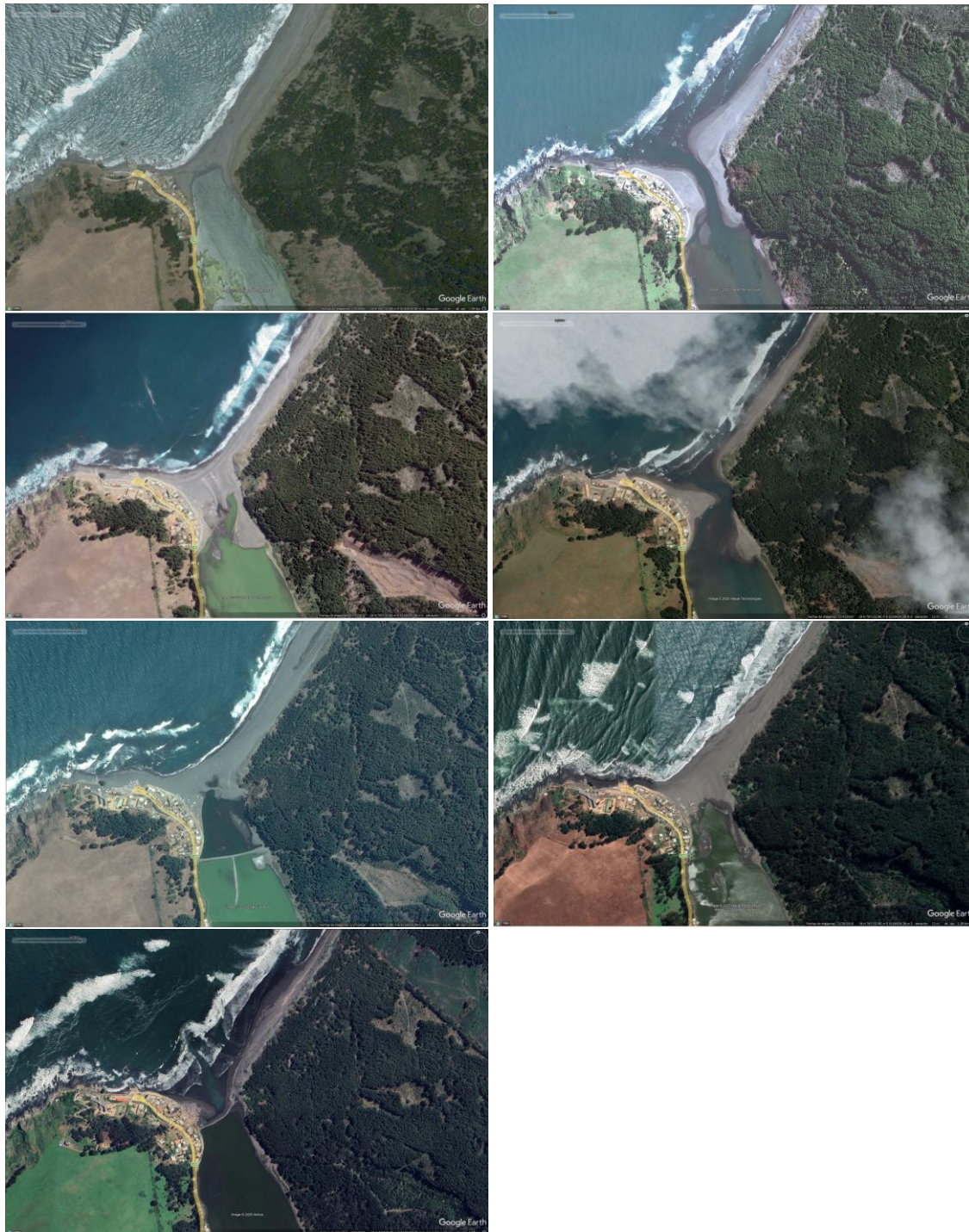


Figura 4. Imágenes satelitales del Estuario de Llico. De la izquierda arriba, hacia la derecha y abajo: 09 de septiembre 2005, no hay intercambio entre el estero Llico y el océano; 02 de agosto de 2010, existe intercambio de agua entre el estero Llico y el océano; 14 de marzo de 2013, no hay intercambio entre el estero Llico y el océano; 04 de noviembre de 2014, existe intercambio de agua entre el estero Llico y el océano; 27 de febrero de 2016, se observa la barra artificial que impide el intercambio de aguas entre el estero y el océano; 20 de diciembre de 2019, no hay intercambio de agua entre el estero Llico y el

océano; 07 de octubre de 2023, se observa la barra artificial que impide el intercambio de aguas entre el estero y el océano.

Los antecedentes históricos señalan que las aguas del lago Vichuquén son salobres de manera natural, y que la conexión entre el lago y el océano mediante el Estero Llico es un elemento constitutivo del sistema, que se habría ido perdiendo principalmente como consecuencia de actividades antrópicas, resultando en la estratificación de la columna de agua. El ingreso del agua de mar al lago Vichuquén a través del Estero Llico, bajo un análisis histórico, constituye parte fundamental del funcionamiento natural del sistema, y, por lo tanto, no debiera ser considerado ni un problema ni un enemigo.

4 Causas y factores determinantes de la contaminación actual en la cuenca del lago Vichuquén y el estuario de Llico

Como se ha mencionado anteriormente, múltiples factores han contribuido al deterioro de la calidad del agua en el Complejo Lacustre Vichuquén. Estos factores se describen a continuación. Las posibles soluciones para muchas de estas causas se abordan en una sección posterior, más adelante.

4.1 Deforestación y plantaciones forestales exóticas

La tala de bosques nativos, su reemplazo por plantaciones forestales exóticas y la tala rasa se han reconocido como el factor más importante en el aumento de los flujos de nutrientes y sedimentos hacia los cuerpos de agua aguas abajo,¹⁸ al tiempo que reduce los volúmenes promedio anuales de escorrentía de agua dulce y los caudales estivales.^{19,20,21,22}

4.1.1 Historia y alcance

El uso del suelo predominante en la cuenca del lago es el uso forestal con especies exóticas, y desde hace más de un siglo se lleva a cabo una tala intensiva de árboles. Entre las décadas de

¹⁸ Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 2008. Evaluación Limnológica General del Lago Vichuquén. Informe técnico. Universidad de Concepción, Concepción.

¹⁹ Pizarro, R., Valdés-Pineda, R., Garcia-Chevesich, P. A., Ibáñez, A., Pino, J., Scott, D. F., ... & Ubilla, P. (2022). The large-scale effect of forest cover on long-term streamflow variations in mediterranean catchments of central Chile. *Sustainability*, 14(8), 4443. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4443>

²⁰ Alvarez-Garreton, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6), 473. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/6/473>

²¹ Iroumé, A., & Palacios, H. (2013). Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile. *Journal of Hydrology*, 505, 113-125. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169413006847>

²² Little, C., Lara, A., McPHEE, J., & Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of hydrology*, 374(1-2), 162-170. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169409003345?via%3Dihub>

1890 y 1950, prácticamente la totalidad del bosque nativo de la cuenca fue talada con fines madereros y agrícolas; posteriormente, a mediados del siglo XX, grandes extensiones fueron sustituidas por plantaciones monoespecíficas de especies arbóreas no nativas.²³ Estas plantaciones son objeto de tala rasa de manera regular, a menudo con escasas o nulas medidas implementadas para prevenir la erosión y proteger la calidad del agua local. Según un informe de EULA, el monocultivo forestal abarcaba el 65% del área de drenaje en 2009, mientras que el bosque nativo cubría menos del 1%.²⁴ Del mismo modo, según Map Biomas Chile, aproximadamente el 68% de la subcuenca del lago Vichuquén estaba destinada a plantaciones forestales en 2024 (véase la Figura 5 a continuación). Un análisis de Global Forest Watch indica que más del 80% del área de la cuenca cubierta por plantaciones forestales ha sido talada en algún momento entre 2001 y 2024 (véase la Figura 6 a continuación).²⁵

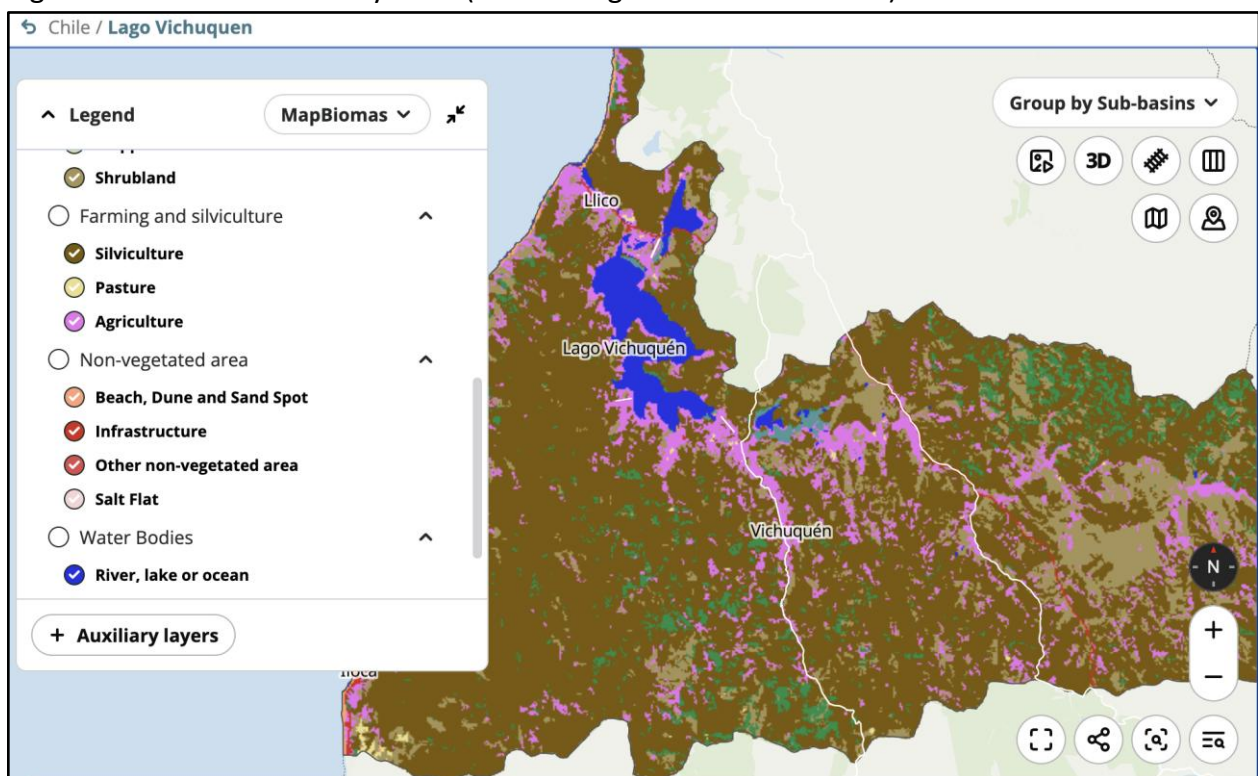


Figura 5. Mapa de uso del suelo de la subcuenca del Lago Vichuquén. Las áreas de color café oscuro están designadas como plantación forestal. Fuente: [Map Biomas Chile](#).

²³ Troncoso, Pablo César Pedreros, et al. "Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales." *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha* 9.1 (2019): 149-177.
<https://www.halacsolcha.org/index.php/halac/article/view/354>

²⁴ EULA 2016. Informe Final: "Diagnóstico Y Caracterización Del Estado Trófico Del Lago Vichuquén". Ver Sección 5.9.2.1

²⁵ Global Forest Watch. <https://gfw.global/znQ3Pe>

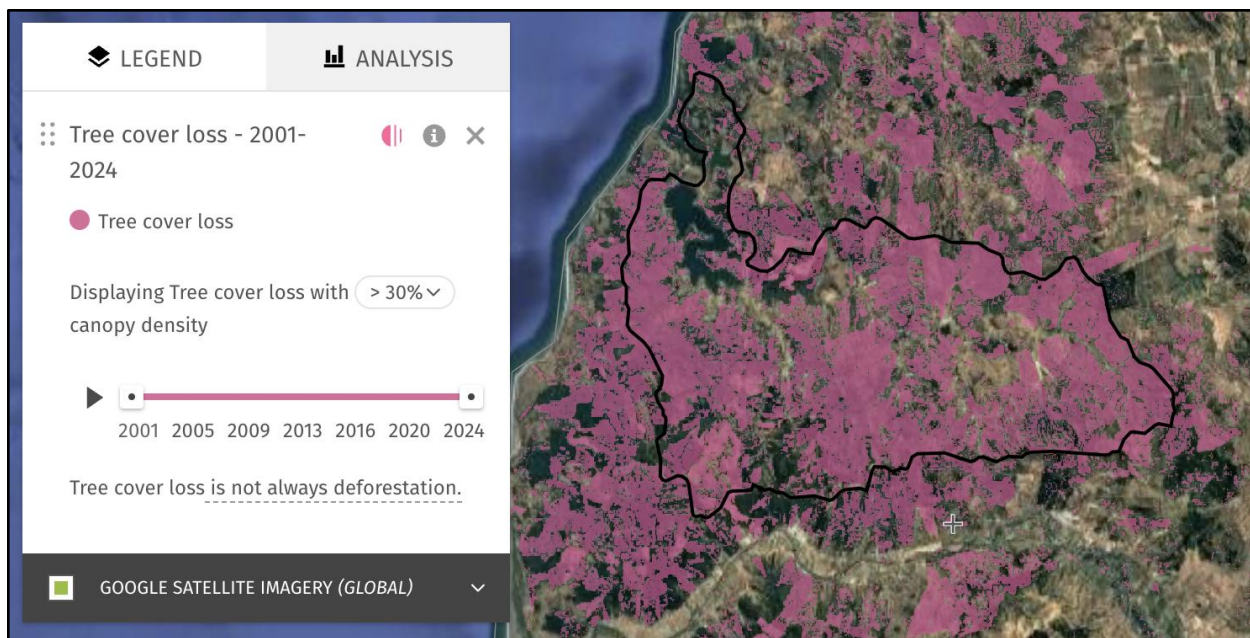


Figura 6. Pérdida de cobertura forestal 2001-2024 (rosa) en la cuenca del lago Vichuquén (línea negra). Fuente: [Global Forest Watch](https://www.globalforestwatch.org/).

4.1.2 Nutrientes y sedimentos

El desmonte y la tala asociados a las operaciones forestales en la cuenca hidrográfica pueden afectar negativamente la calidad del agua de múltiples maneras. Las plantaciones forestales suelen utilizar grandes cantidades de fertilizantes²⁶ y herbicidas para acelerar las tasas de crecimiento y mejorar la producción. Cuando se cosechan los árboles —a menudo mediante la tala rasa—, el suelo subyacente queda alterado y expuesto, lo que provoca elevadas tasas de erosión del suelo, así como el arrastre de sedimentos ricos en nutrientes y de herbicidas hacia el lago. Muchas de las plantaciones de la cuenca se encuentran ubicadas en laderas empinadas, lo cual incrementa el riesgo de erosión.²⁷

En 2008, se registró un gradiente de mayor concentración de sólidos en suspensión y turbidez en el lago Vichuquén, cerca del estero Vichuquén. Estos parámetros disminuyeron a medida que avanzaba el flujo hacia el estero Llico. Dichos gradientes corresponden a mayores cargas de sólidos en suspensión y nutrientes que ingresan al lago Vichuquén a través del estero Vichuquén. Al realizar las mediciones bajo condiciones invernales, se determinó que **una carga**

²⁶ CONAF 2020. Informe Inicial de la Avifauna Presente en la Laguna Torca. Ver Capítulo 8.

²⁷ Troncoso, Pablo César Pedreros, et al. "Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales." *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha* 9.1 (2019): 149-177.

de 7,3 toneladas diarias de sedimentos ingresaba al lago a través del estero Vichuquén.²⁸ Las mediciones de nutrientes realizadas en los afluentes del lago Vichuquén entre agosto de 2015 y mayo de 2016 mostraron que las mayores cargas de nutrientes ingresaron al lago a través del Estero Vichuquén, principalmente durante la temporada invernal.²⁹

El informe EULA (2016)³⁰ estimó que **el aporte difuso de nutrientes desde la cuenca hacia el lago —debido principalmente a los usos agrícolas y forestales del suelo— osciló entre 2009 y 2015 en un rango de 5 a 25 toneladas anuales de fósforo y de 50 a 230 toneladas anuales de nitrógeno.** Además de transportar nutrientes y herbicidas hacia el lago, los sedimentos arrastrados al interior del mismo pueden aumentar la turbidez del agua y, al depositarse, reducir la profundidad y el volumen total del lago, lo cual puede repercutir en la temperatura del agua y en su idoneidad para los peces y otras especies silvestres. Las actividades humanas en la cuenca han contribuido a que la profundidad máxima del lago disminuyera de 37 a 31 metros entre 1872 y 2016.³¹ Un estudio de 2010 realizado por el Centro de Información de Recursos Naturales encontró que más de la mitad de la comuna de Vichuquén estaba experimentando erosión moderada, severa o muy severa.³²

²⁸ Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 2008. Evaluación Limnológica General del Lago Vichuquén. Informe técnico. Universidad de Concepción, Concepción.

²⁹ Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 2016. Diagnóstico y caracterización del estado trófico del lago Vichuquén. Universidad de Concepción, Concepción.

³⁰ Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 2016. Diagnóstico y caracterización del estado trófico del lago Vichuquén. Universidad de Concepción, Concepción.

³¹ Troncoso, Pablo César Pedreros, et al. "Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales." *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha* 9.1 (2019): 149-177.

³² CIREN. 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile, Región del Maule. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstreams/045ae742-4213-45c2-bb8e-1c1860edb4f9/download>

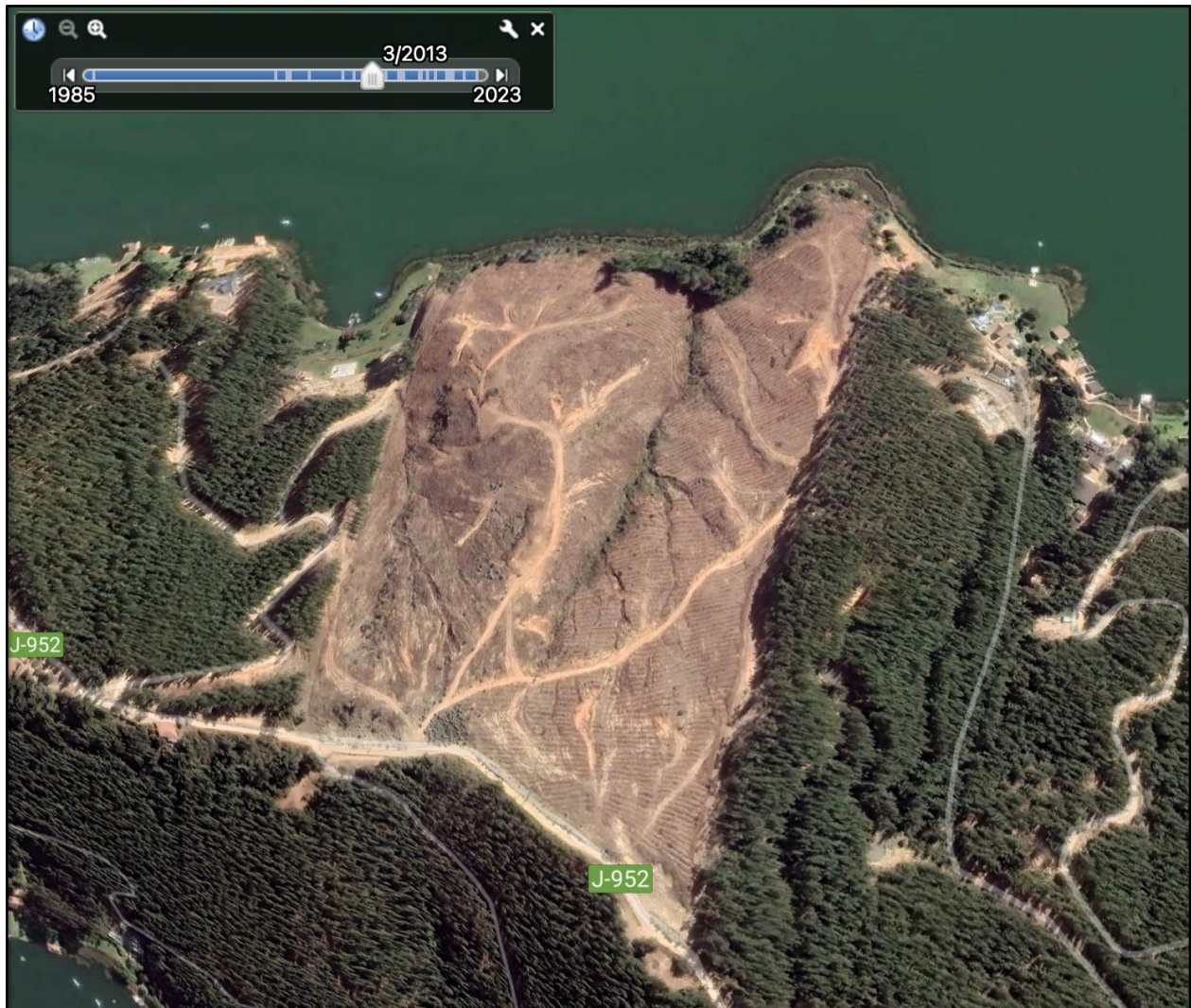


Figura 7. Ejemplo de tala rasa en una cuenca hidrográfica carente de medidas mínimas para proteger el suelo y la calidad del agua. Fuente: [GoogleEarth](https://www.google.com/earth/).

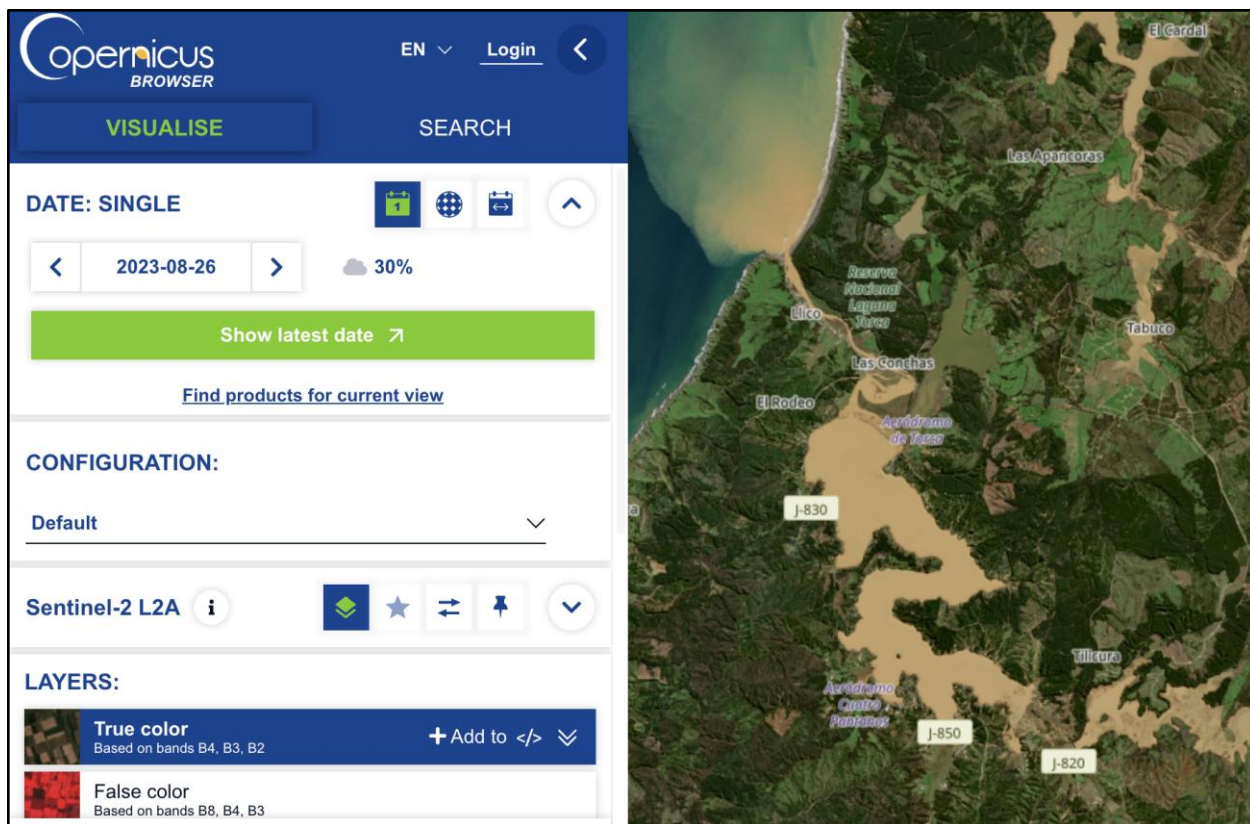


Figura 8. Imagen satelital del 26 de agosto del 2023 donde se observa una gran carga de sedimentos ingresando y transitando a través de la laguna Tilicura, el estero Vichuquén, el lago Vichuquén, el estuario de Llico y descargándose en la costa. Fuente: [Copernicus Browser](https://www.copernicus-browser.com/).

4.1.3 Volumen de escorrentía y caudales estivales

Además de las preocupaciones relacionadas con los nutrientes y los sedimentos, las plantaciones forestales pueden afectar los volúmenes y las tasas de escorrentía. Diversos estudios realizados en Chile han revelado que las plantaciones forestales exóticas — principalmente de *Pinus radiata* y eucalipto— reducen la escorrentía anual promedio y ejercen impactos particularmente significativos sobre los caudales durante el verano y la estación seca.^{33,34,35,36} Investigadores del Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia encontraron

³³ Pizarro, R., Valdés-Pineda, R., Garcia-Chevesich, P. A., Ibáñez, A., Pino, J., Scott, D. F., ... & Ubilla, P. (2022). The large-scale effect of forest cover on long-term streamflow variations in mediterranean catchments of central Chile. *Sustainability*, 14(8), 4443. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4443>

³⁴ Alvarez-Garretón, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6), 473. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/6/473>

³⁵ Iroumé, A., & Palacios, H. (2013). Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile. *Journal of Hydrology*, 505, 113-125. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169413006847>

³⁶ Little, C., Lara, A., McPHEE, J., & Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of hydrology*, 374(1-2), 162-170. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169409003345?via%3Dihub>

que las cuencas hidrográficas en las que casi la totalidad de los bosques nativos han sido reemplazados por plantaciones forestales de especies exóticas podrían experimentar una disminución del 40% en la escorrentía media anual.³⁷ Asimismo, encontraron que la restauración de las plantaciones exóticas, cuando se reconvierten a bosques nativos, incrementaron los caudales fluviales anuales «entre un 40% y más del 100% en la mayoría de los años, y en más del 150% durante el otoño y el verano de algunos años», y que «la restauración de los bosques nativos restableció gradualmente los reservorios de humedad en el suelo profundo que sustentan el caudal base durante los periodos de sequía».³⁸

4.2 Agricultura / Pastizales

En 2009, aproximadamente el 6% de la cuenca del lago se destinaba a la agricultura.³⁹ Según Map Biomas Chile, aproximadamente el 10% de la subcuenca del lago Vichuquén se destinó a la agricultura o a pastizales en 2024 (Fig. 9). En la Figura 9, muchas viviendas y jardines a lo largo de la orilla del lago fueron clasificadas como agrícolas.

³⁷ Alvarez-Garretón, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6), 473. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/6/473>

³⁸ Lara, A., Jones, J., Little, C., & Vergara, N. (2021). Streamflow response to native forest restoration in former Eucalyptus plantations in south central Chile. *Hydrological Processes*, 35(8), e14270. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/hyp.14270>

³⁹ Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 2016. Diagnóstico y caracterización del estado trófico del lago Vichuquén. Universidad de Concepción, Concepción.

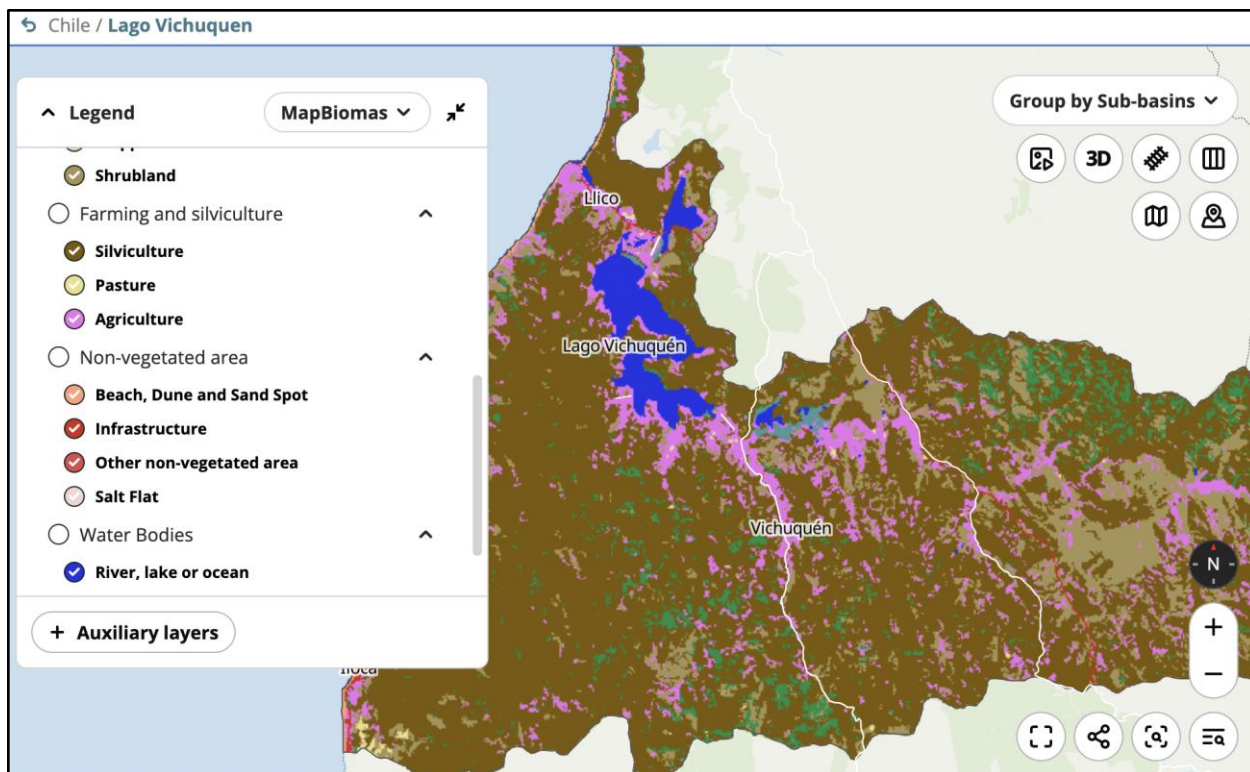


Figura 9. Mapa de uso del suelo de la subcuenca del lago Vichuquén. Las áreas de color rosa están designadas como agrícolas, lo cual, según el análisis de imágenes satelitales, parece incluir algunas pasturas y viviendas. Fuente: [Map Biomas Chile](#).

Las imágenes satelitales actuales muestran la presencia continua de tierras agrícolas (viñedos, árboles frutales, etc.) y de extensas zonas de pastizales (para ovejas y vacas) en la cuenca hidrográfica, particularmente en los valles fluviales y en las áreas más llanas que rodean el lago. Si bien ocupan solo una pequeña fracción de la superficie total, se considera que las tierras agrícolas (incluidos los pastizales) constituyen una fuente importante de nutrientes que llegan al lago,⁴⁰ debido a la escorrentía contaminada con residuos animales y fertilizantes (los cuales pueden utilizarse tanto en los cultivos como en los pastizales mejorados). Además, los herbicidas y plaguicidas empleados en las tierras agrícolas pueden ser arrastrados hacia los cursos de agua cercanos y desembocar en el lago. Asimismo, las tierras agrícolas de la cuenca hacen uso tanto de aguas superficiales como subterráneas, lo que reduce el volumen de agua dulce que ingresa al lago y al estuario.⁴¹

⁴⁰ Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 2016. Diagnóstico y caracterización del estado trófico del lago Vichuquén. Universidad de Concepción, Concepción. Ver Sección 5.10

⁴¹ Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA. VII Región del Maule. https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2025/12/Derechos_Concedidos_VII_Region-1.xls



Figura 10. Ejemplo de pastizal y terreno agrícola en la cuenca, adyacente al lago Vichuquén, con erosión visible. Fuente: [GoogleEarth](https://www.google.com/earth/).

4.3 Urbanización, aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas residuales

El desarrollo y el crecimiento demográfico en la cuenca del lago han incrementado tanto el consumo de agua como la producción de aguas residuales. Tanto las aguas residuales no tratadas como las insuficientemente tratadas aportan nutrientes, patógenos y otros contaminantes al lago.^{42,43,44} Las plantas de tratamiento en la cuenca hidrográfica tienen una cobertura limitada, podrían alcanzar tasas más altas de eliminación de nutrientes y, actualmente, descargan efluentes tratados en los cursos de agua de la cuenca. Los residuos humanos y los detergentes constituyen las principales fuentes de nutrientes en las aguas residuales, las cuales deben ser debidamente tratadas antes de su descarga.

La eliminación de nutrientes por parte de las plantas compactas de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados puede variar considerablemente; esto depende de la calidad de su mantenimiento y operación, así como de si fueron diseñadas específicamente para la eliminación de nitrógeno y fósforo. Si las plantas de tratamiento y los sistemas sépticos de la cuenca no logran eliminar porcentajes elevados de nitrógeno y fósforo de las aguas

⁴² Troncoso, Pablo César Pedreros, et al. "Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales." *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha* 9.1 (2019): 149-177.

⁴³ CONAF 2020. Informe Inicial de la Avifauna Presente en la Laguna Torca. Ver Capítulo 8.

⁴⁴ DGA 2025. Minuta: DCPRH No 2, Informa resultados de los últimos muestreo verano y primavera 2024 y análisis del estado trófico actual de Lago Vichuquén, región del Maule.

residuales, los nutrientes presentes en estas podrían convertirse en un factor determinante en el aporte de nutrientes al lago. Asimismo, los fertilizantes, herbicidas y plaguicidas utilizados en jardines y labores de paisajismo pueden ser arrastrados hacia el lago, contribuyendo así a los problemas de calidad del agua.

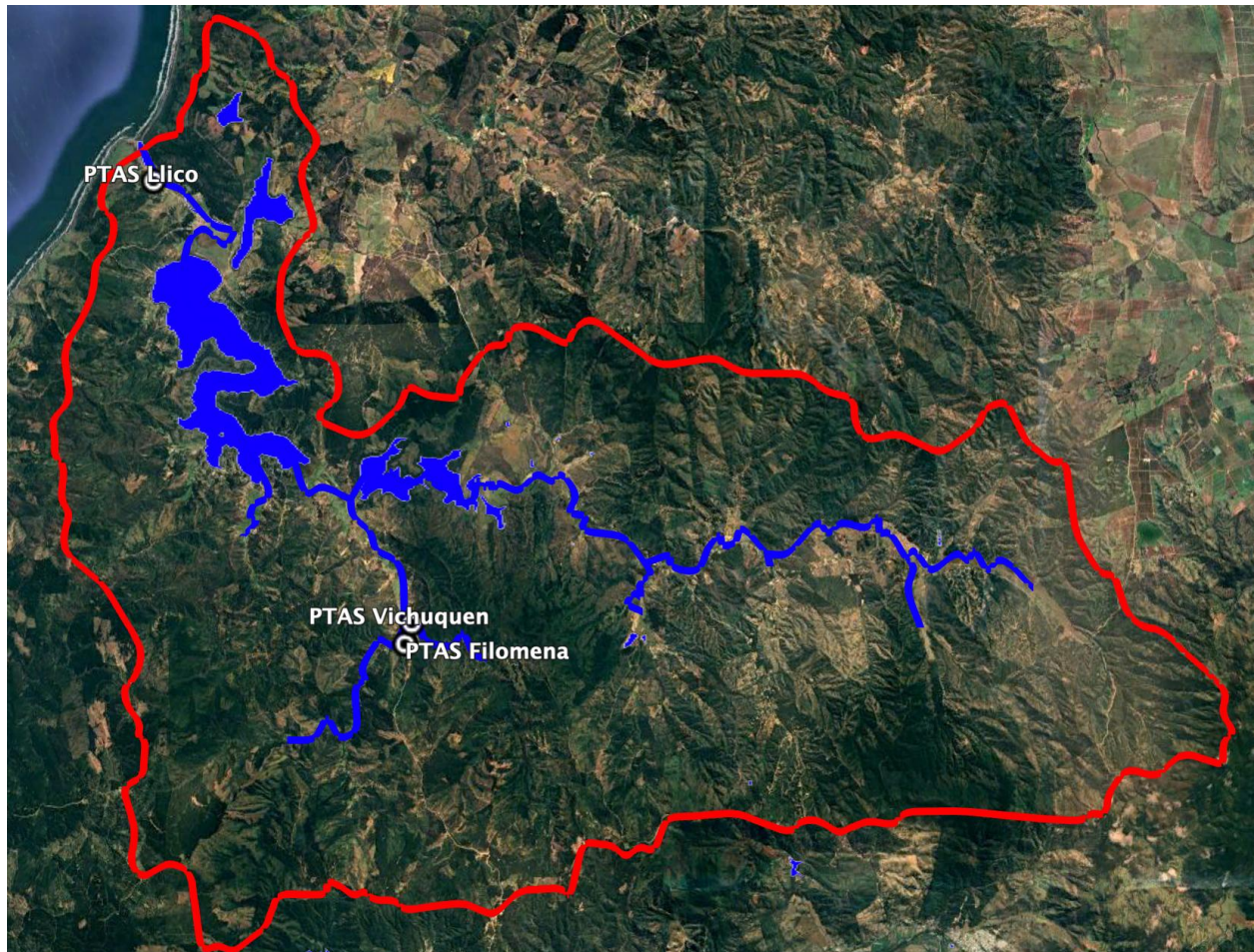


Figura 11. Ubicaciones de las plantas de tratamiento conocidas en la cuenca.

Múltiples personas y entidades en la cuenca tienen derechos para utilizar las aguas superficiales y subterráneas para agua potable, uso doméstico y saneamiento.⁴⁵ Tanto la extracción de agua autorizada como la no autorizada que se realice en la cuenca pueden disminuir la cantidad de agua dulce que llega al lago.

Como se mencionó anteriormente en relación con las prácticas forestales, sin medidas adecuadas de control de la erosión, la construcción de caminos y la tala de bosques para edificaciones también pueden provocar erosión y el transporte de sedimentos al lago (Fig. 12).

⁴⁵ Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA. VII Región del Maule.
https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2025/12/Derechos_Concedidos_VII_Region-1.xls



Figura 12. Desmonte del terreno en 2022/2023 a lo largo de un camino empinado construido directamente en la ladera. Observar los canales de erosión visibles y los sedimentos en la base de la colina, cerca del lago. Fuente: [GoogleEarth](https://www.google.com/earth/).

4.4 Cierre artificial del estuario

Si bien la desembocadura del estuario, que al menos hasta 1873 estaba permanentemente conectada con el mar de acuerdo a los antecedentes históricos, y en la actualidad se abre y cierra de forma natural, también ha sido abierta y cerrada artificialmente con frecuencia para controlar los niveles de agua en el estuario y en el lago (véanse las figuras a continuación). En 2016 se elaboró un «Protocolo para la apertura y cierre de la desembocadura del estuario de Llico». Sin embargo, su eficacia ha sido cuestionada, y recientes impugnaciones legales contra

los cierres artificiales lograron levantar un cierre en 2023 y prohibir cualquier cierre futuro sin la debida autorización legal.^{46,47} A pesar de ello, los cierres artificiales han continuado.⁴⁸

El cierre de la desembocadura puede provocar el estancamiento del lago y agravar los problemas de calidad del agua relacionados con los nutrientes y otros contaminantes. Según la Dirección General de Aguas (DGA):⁴⁹

“La salida del lago al mar a través del Estero Llico, es un punto crítico en el funcionamiento intra-anual del lago, la alteración de este canal de comunicación con el mar puede generar problemas en el funcionamiento natural de este sistema debido al aumento del tiempo de permanencia del agua, así como de las tasas de retención de nutrientes y otros elementos, que podrían eventualmente difundir desde el estero hacia la sección distal del lago. Se considera que la alteración tendiente al estancamiento del agua, sumado a los problemas causados por la salinidad, también puede contribuir a un aumento en la presencia de bacterias, con un énfasis especial en los coliformes fecales, por el riesgo que representan para la salud de las personas.”

Las imágenes de febrero y abril de 2016 parecen mostrar grandes cantidades de algas en el estuario mientras este permanecía cerrado artificialmente (Fig. 13). Investigadores que utilizaron imágenes satelitales y muestreos in situ determinaron que, durante ese mismo periodo, gran parte del lago se encontraba en estado eutrófico, con algunas zonas hipereutróficas (lo que significa que el lago presentaba altas concentraciones de nutrientes y niveles de algas).⁵⁰ Esto sugiere que el cierre del estuario no impidió la proliferación de algas, e incluso podría haber contribuido a su ocurrencia.

⁴⁶ Taller N°2 AVGC Vichuquén: Clasificación de problemas, priorización y Pertinencia https://www.agenciasustentabilidad.cl/resources/uploads/documentos/archivos/489/preparacion_taller_2_avgc_vichuquen%2C_presentacion.pdf

⁴⁷ Ruling in favor of environmental protection: Talca Court of Appeals orders the restoration of the Llico Stream. <https://en.fima.cl/2024/05/13/sentencia-a-favor-de-la-proteccion-medioambiental-corte-de-apelaciones-de-talca-ordena-el-restablecimiento-del-estero-llico/>

⁴⁸ La Tercera. Cartas al director. Lago Vichuquén. May 2025. <https://www.latercera.com/cartas-al-director/noticia/lago-vichuquen/>

⁴⁹ DGA 2025. Minuta: DCPRH No 27. Informa resultados del último muestreo de verano 2025 y actualización del estado trófico del Lago Vichuquén, región del Maule.

⁵⁰ Briceño-de-Urbaneja, I., Pérez, W., San Miguel, D., & Ramos, S. (2018). Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile. *Revista de teledetección*, (52), 67-78. <https://www.academia.edu/download/106360633/10880.pdf>



Figura 13. Cierre artificial del estuario en 2016. Observar la aparente acumulación de algas aguas arriba del cierre artificial. Las imágenes disponibles de Copernicus indican que el cierre probablemente se mantuvo desde finales de 2015 hasta junio de 2017. Fuente: [GoogleEarth](https://www.google.com/earth/).



Figura 14. Cierre artificial del estuario en 2023. Fuente: [GoogleEarth](https://www.google.com/earth/).

4.5 El tsunami de 2010 y otras intrusiones de agua salada

La salinidad del lago Vichuquén ha variado a lo largo del tiempo, pasando de un entorno de bahía marina a un entorno lacustre estratificado. Procesos naturales, tales como el levantamiento tectónico y los cambios climáticos, han propiciado la transición de un entorno marino a uno marino-salobre y, posteriormente, de salobre a estratificado, con la presencia de condiciones anóxicas en periodos de menor precipitación.⁵¹ Tal como se describe al comienzo de este informe, a lo largo de la historia del lago se han producido afluencias naturales de agua salada hacia el mismo. El agua salada puede ingresar al estuario y al lago durante las mareas de tormenta, las mareas extremas y eventos como el tsunami de 2010, que elevó temporalmente el nivel del agua del lago en 40 cm.⁵² Si bien estas afluencias han ocurrido históricamente, el cambio climático, el aumento del nivel del mar y la disminución de los flujos de agua dulce — debido a cambios en el uso del suelo y a la sequía— podrían incrementar la frecuencia y el

⁵¹ Frugone-Álvarez, M., Latorre, C., Giralt, S., Polanco-Martínez, J., Bernárdez, P., Oliva-Urcia, B., ... & Valero-Garcés, B. (2017). A 7000-year high-resolution lake sediment record from coastal central Chile (Lago Vichuquén, 34° S): implications for past sea level and environmental variability. *Journal of Quaternary Science*, 32(6), 830-844. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/112524319/jqs.293620240318-1-93nqxx-libre.pdf>

⁵² Troncoso, Pablo César Pedreros, et al. "Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales." *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha* 9.1 (2019): 149-177.

volumen de agua salada que ingresa al lago.^{53,54} El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) pronostica un aumento adicional del nivel del mar de 0,35 metros en la zona para el año 2100, bajo un calentamiento de 2°C con respecto a una línea de base de 1995-2014.⁵⁵ Los aportes de agua salada pueden afectar la calidad del agua del lago de múltiples maneras, incluyendo los niveles de salinidad y de oxígeno disuelto, así como mediante la alteración de la disponibilidad de nutrientes. Estos flujos también podrían transportar nutrientes o sedimentos desde el estuario hacia el lago.

Según la Dirección General de Aguas (DGA):⁵⁶

“El ingreso de agua salada históricamente al lago ha causado cambios fisicoquímicos en la columna de agua que modifica los equilibrios de nutrientes (fósforo principalmente) y salinidad, siendo este último un factor importante en la disminución de oxígeno disuelto en el agua alcanzando niveles de anoxia y en otorgar la sinergia necesaria para movilizar nutrientes desde los sedimentos a la columna de agua.”

En la siguiente sección del informe se incluye información adicional sobre el papel del agua salada en la disponibilidad de nutrientes y en las proliferaciones algales.

4.6 Sequía

Durante las últimas décadas, la región central de Chile ha estado experimentando una megasequía, registrándose menos precipitaciones en la zona del sistema lacustre.^{57,58,59} Distintas fuentes, incluida la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y el Monitor Global de Sequía del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), muestran que el área continuó experimentando condiciones de sequía en el momento de este informe (enero de 2026).^{60,61} Las sequías pueden afectar la temperatura del agua, el volumen y el tiempo de residencia hidráulica de un lago (el tiempo que el agua permanece en el lago).

⁵³ IEA. National Climate Resilience Assessment for Chile. <https://www.iea.org/reports/national-climate-resilience-assessment-for-chile>

⁵⁴ Erosión costera incide en impactos de las marejadas. <https://www.uc.cl/noticias/erosion-costera-incide-en-impactos-de-las-marejadas/>

⁵⁵ NASA Sea Level Projection Tool. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

⁵⁶ DGA 2025. Minuta: DCPRH No 27. Informa resultados del último muestreo de verano 2025 y actualización del estado trófico del Lago Vichuquén, región del Maule. Ver Sección 5.

⁵⁷ Informe A Las Naciones, La megasequía 2010-2019: una lección para el futuro. <https://www.cr2.cl/megasequia/>

⁵⁸ Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Marinao, R., & Galleguillos, M. (2025). Increasing water stress in Chile revealed by novel datasets of water availability, land use and water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(20), 5185-5212. <https://hess.copernicus.org/articles/29/5185/2025/hess-29-5185-2025.pdf>

⁵⁹ CONAF 2020. Informe Inicial de la Avifauna Presente en la Laguna Torca. Ver Capítulo 3.

⁶⁰ NOAA. Global Drought Conditions. <https://www.drought.gov/international>

⁶¹ SPEI Global Drought Monitor. <https://spei.csic.es/map/maps.html#months=5#month=10#year=2025>

5 Cómo interactúan estos factores y contribuyen a las proliferaciones de algas y a los problemas de calidad del agua

Las altas concentraciones de nutrientes, las condiciones de estancamiento (largos tiempos de residencia hidráulica) y las temperaturas del agua más cálidas son condiciones clave que pueden propiciar la proliferación de algas tóxicas. Se considera que las plantaciones forestales, la agricultura y el pastoreo, así como las aguas residuales no tratadas o insuficientemente tratadas, son las principales fuentes de aporte de fósforo y nitrógeno al lago, tanto histórica como actualmente.^{62,63} De hecho, los aportes de nutrientes derivados de las actividades humanas superan con creces lo que cabría esperar de los procesos naturales de transporte y ciclo de nutrientes. Con el paso del tiempo, se han acumulado altos niveles de nutrientes en los sedimentos del lecho lacustre, al tiempo que continúan ingresando al lago grandes cantidades de nutrientes debido a las prácticas forestales, la escorrentía agrícola y los efluentes de aguas residuales.

La entrada de sedimentos al lago puede aumentar los niveles de turbidez y reducir la profundidad del agua, lo cual, a su vez, puede provocar un aumento en la temperatura del agua. Las intrusiones de agua salada han generado una capa de agua más salina en el fondo del lago, la cual limita la mezcla de las aguas a lo largo de la columna de agua e impide que el oxígeno llegue al lecho del lago. Del mismo modo, el clima más cálido puede generar una estratificación térmica en el lago, impidiendo la mezcla y provocando una disminución en los niveles de oxígeno disuelto en el fondo. Las condiciones de bajo nivel de oxígeno en el lecho lacustre generan condiciones fisicoquímicas que propician la liberación de fósforo desde los sedimentos hacia el agua circundante. Los periodos de mayor mezcla —ocasionados por tormentas o por eventos de renovación de las aguas del lago (tras la llegada de un clima más fresco)— pueden transportar estos nutrientes liberados hacia la superficie del lago, donde quedan a disposición de las algas y las cianobacterias.

Las sequías y el clima más cálido pueden elevar la temperatura del agua y reducir los niveles de oxígeno disuelto; asimismo, las sequías, el cierre artificial del estuario y la disminución de la escorrentía proveniente de las plantaciones forestales limitan, cada uno por su parte, la salida de agua del lago, lo que incrementa las concentraciones de nutrientes y los tiempos de residencia hidráulica en su interior, creando así condiciones más propicias para la proliferación de algas. El diagrama que se presenta a continuación ilustra muchos de estos factores clave, así

⁶² EULA 2016. Informe Final: "Diagnóstico Y Caracterización Del Estado Trófico Del Lago Vichuquén". Ver Sección 5.10

⁶³ Troncoso, Pablo César Pedreros, et al. "Reconstruyendo la degradación ambiental del Lago Vichuquén, Región del Maule, Chile, mediante el uso de registros históricos-documentales." *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha* 9.1 (2019): 149-177.

como las relaciones que conducen a la proliferación de algas nocivas y a la presencia de altas concentraciones de patógenos transmitidos por el agua en la cuenca hidrográfica.

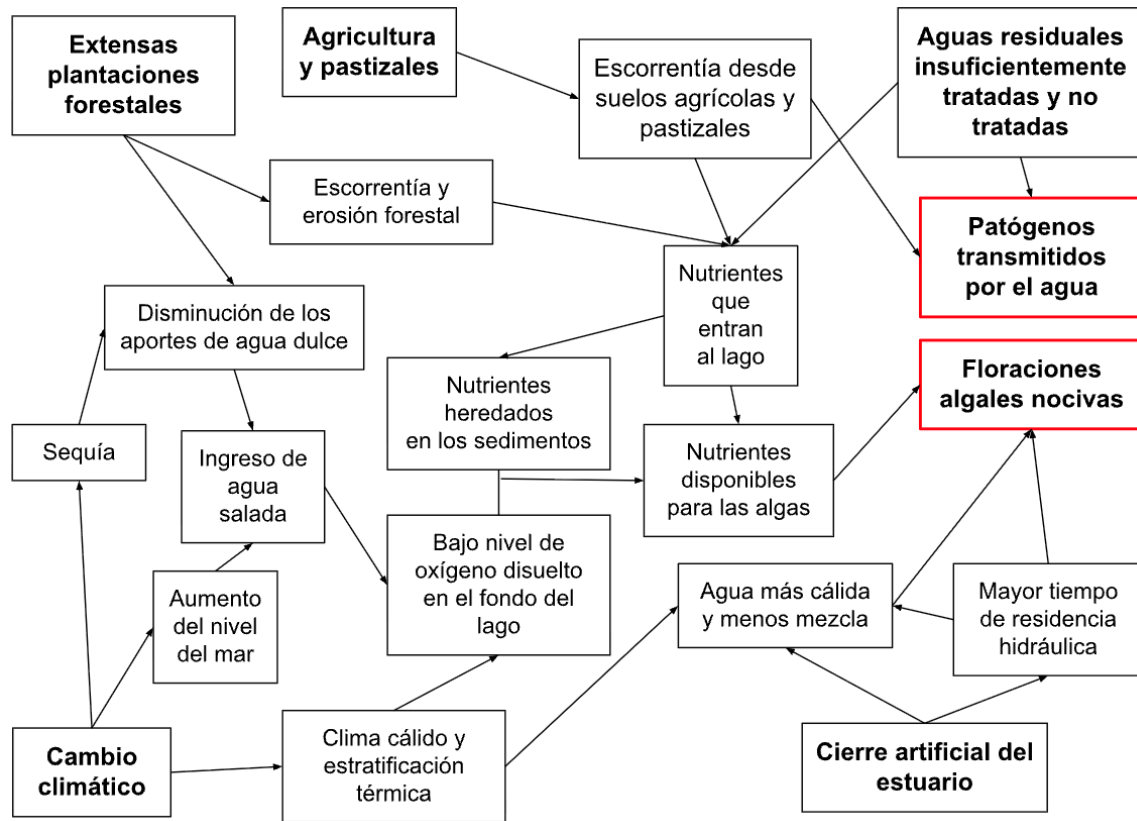


Figura 15. Diagrama de los factores clave y las interconexiones que contribuyen a los problemas de calidad del agua en la cuenca.

Es importante señalar que la causa principal de las floraciones algales tóxicas en el lago Vichuquén es la alta concentración y disponibilidad de nutrientes —principalmente fósforo y nitrógeno— que ingresan al lago y que son liberados desde sus sedimentos. Las afirmaciones y estrategias que centran la causa de las floraciones tóxicas en los influjos de agua salada, ignorando al mismo tiempo el papel de los nutrientes, resultan incompletas y engañosas. Históricamente, el lago Vichuquén ha recibido aportes significativos de agua de mar de manera regular. Dado el perfil de profundidad del lago, su estratificación térmica cíclica y el ingreso continuo de sedimentos, materia orgánica y nutrientes, es altamente probable que las zonas más profundas del lago experimenten regularmente bajas concentraciones de oxígeno disuelto, así como la liberación hacia la columna de agua del fósforo acumulado en los sedimentos, incluso en ausencia de agua salada.

Al priorizar los enfoques para mejorar la calidad del agua, resultará fundamental comprender que las floraciones algales podrían seguir produciéndose en condiciones de alta concentración de nutrientes y sin presencia de agua salada en el lago. Por el contrario, dichas floraciones no ocurrirían si las concentraciones de nutrientes fueran muy bajas, aun cuando hubiera presencia de agua salada. Un ejemplo que ilustra este punto es el caso de la cianobacteria *Microcystis aeruginosa*, descrita como la especie responsable de generar, al menos en parte, estas floraciones, es una especie de agua dulce que prolifera en aguas ricas en nutrientes, y que, por tanto, no requiere de agua salada ni salobre para su crecimiento.^{64,65}

6 Opciones para la mejora de la calidad del agua y la restauración de lagos

Mejorar y proteger la calidad del agua del Lago Vichuquén y de la cuenca del Estuario de Llico a largo plazo requerirá la implementación de múltiples soluciones a lo largo de muchos años, aunque algunas de las posibles soluciones que se analizan a continuación podrían generar mejoras notables en un periodo de tiempo más breve. Dado el papel fundamental que desempeñan los nutrientes en esta problemática, muchas de las opciones que se presentan a continuación se centran en eliminar o reducir de manera significativa las principales fuentes de nutrientes que ingresan al lago, extraer los nutrientes presentes en él o reducir la disponibilidad de dichos nutrientes dentro del cuerpo de agua. Si bien estas dos últimas medidas contribuirían a mejorar la calidad del agua, la duración y la magnitud de tales beneficios se verían mermadas si persistiera el ingreso significativo de nutrientes al lago.

El volumen comparativo de agua dulce y agua salada que ingresa al lago constituye otro factor que incide en la calidad del agua de múltiples maneras. Varias de las opciones relativas al uso del suelo y a la gestión del lago que se exponen a continuación guardan relación con la mejora, tanto en calidad como en cantidad, de los aportes de agua dulce, o bien con la limitación de las intrusiones de agua salada hacia el lago mediante el incremento del flujo de salida desde el lago hacia el océano.

6.1 Evitar que los nutrientes entren en el lago

6.1.1 Estudios de nutrientes

Si bien ya se conoce mucho sobre las fuentes de nutrientes que ingresan al lago y la presencia de estos en los sedimentos lacustres, la realización de estudios adicionales sobre nutrientes podría ayudar a priorizar proyectos, hacer un uso más eficiente de los recursos limitados, identificar soluciones más matizadas y monitorear los cambios que pudieran ocurrir. Estos

⁶⁴ *Microcystis aeruginosa*. https://en.wikipedia.org/wiki/Microcystis_aeruginosa

⁶⁵ Crisis en Lago Vichuquén: la peligrosa “marea verde” que afecta a mascotas y alerta a expertos. <https://www.elmartutino.cl/noticia/medioambiente/crisis-en-lago-vichuquen-la-peligrosa-marea-verde-que-afecta-mascotas-y-alerta>

estudios podrían cuantificar los flujos y las reservas de nutrientes; examinar las tasas y los momentos habituales de aplicación de fertilizantes en plantaciones forestales y terrenos agrícolas; evaluar el uso de la tierra en la cuenca y la erosión asociada a cada uso, y medir las concentraciones de nutrientes en múltiples ubicaciones y profundidades de los sedimentos —a lo largo de todo el lago y su cuenca hidrográfica— a lo largo del tiempo, con el fin de ayudar a localizar las fuentes de los aportes.

Esta opción tendría un impacto bajo en la comunidad y contribuiría tanto a priorizar otras posibles soluciones como a minimizar los impactos derivados de las mismas.

6.1.2 Reforestación con especies forestales nativas, prácticas forestales mejoradas y minimización del uso de fertilizantes

Las prácticas forestales en la cuenca hidrográfica han sido identificadas como una fuente importante de nutrientes y sedimentos que llegan al lago, y están reduciendo el volumen de agua dulce que ingresa tanto al lago como al estuario. Por consiguiente, es fundamental abordar dichas prácticas forestales de manera prioritaria con el fin de lograr mejoras significativas y a largo plazo en la calidad del agua.

La erosión del suelo en las plantaciones de pino en el centro de Chile tiende a ser significativamente mayor que en los bosques nativos. Diversos estudios indican que la pérdida anual de suelo bajo plantaciones de *Pinus radiata* puede llegar a ser hasta cuatro veces superior a la registrada bajo bosques nativos de hoja ancha —tales como los de *Nothofagus* spp., observándose tasas de erosión particularmente elevadas en las plantaciones más jóvenes.⁶⁶ Los suelos de las plantaciones de eucalipto también presentan menor contenido de materia orgánica, mayor densidad aparente, mayor contenido de grava, una capa de hojarasca más delgada y propiedades físicas alteradas en comparación con los bosques nativos, lo que favorece la erosión del suelo.^{67,68} Los análisis geoquímicos revelan que las plantaciones exóticas impactan la calidad del agua, ya que presentan una mayor movilización de sedimentos y

⁶⁶ Aburto, F., Cartes, E., Mardones, O., & Rubilar, R. (2020). Hillslope soil erosion and mobility in pine plantations and native deciduous forest in the coastal range of south-Central Chile. *Land Degradation & Development*, 32, 453 - 466. <https://doi.org/10.1002/ldr.3700>.

⁶⁷ Banfield, C., Braun, A., Barra, R., Castillo, A., & Vogt, J. (2018). Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile. *Catena*, 161, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.017>.

⁶⁸ Soto, L., Galleguillos, M., Seguel, O., Sotomayor, B., & Lara, A. (2018). Assessment of soil physical properties' statuses under different land covers within a landscape dominated by exotic industrial tree plantations in south-central Chile. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74, 12 - 23. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.1.12>.

concentraciones de elementos traza en los arroyos, lo que indica una erosión física intensificada en comparación con las áreas de bosque nativo.⁶⁹

Un mayor uso de franjas de vegetación de amortiguación, medidas de control de la erosión y barreras de sedimentos —así como una reducción y un uso más estratégico de los fertilizantes— contribuirían a proteger la calidad del agua en el Lago Vichuquén. El reemplazo de los monocultivos forestales de especies exóticas por especies arbóreas nativas locales en toda la cuenca, sumada a la suspensión de la tala rasa y la transición hacia prácticas forestales de menor impacto, generaría beneficios adicionales para la calidad y cantidad del agua local, así como para el hábitat de la vida silvestre.

Es importante destacar que la reconversión de las plantaciones de especies exóticas a vegetación nativa también incrementaría el volumen de escorrentía de agua dulce que llega al lago particularmente durante el verano;⁷⁰ lo que podría ayudar a arrastrar los nutrientes y las sales fuera del cuerpo de agua, reduciendo a su vez el ingreso de agua salada al mismo.

Esta opción podría repercutir en las empresas forestales, las cuales se verían obligadas a ajustar tanto sus prácticas operativas como su estrategia de mercado. No obstante, también les brindaría la oportunidad de potenciar e integrar actividades de ecoturismo, educación ambiental y recreación en de sus propios terrenos.

6.1.3 Implementar y ampliar las franjas de amortiguación de los arroyos

A partir del análisis de las imágenes satelitales, resulta evidente que los terrenos destinados a la silvicultura, la agricultura y el pastoreo a menudo carecen de franjas de amortiguamiento en torno a los arroyos y cuerpos de agua. La protección de los arroyos y otras vías fluviales mediante franjas de amortiguamiento de vegetación nativa, con una anchura suficiente, puede contribuir a reducir la erosión y a disminuir el arrastre de sedimentos, nutrientes, herbicidas y residuos animales hacia el lago. Asimismo, la protección de las zonas ribereñas puede proporcionar un hábitat importante y reducir la temperatura del agua al generar sombra. La implementación de franjas forestales nativas a lo largo de los arroyos situados en zonas de

⁶⁹ Contreras, A., Álvarez-Amado, F., Aguilar-Gomez, M., Campos-Quiroz, D., Castillo, P., Tardani, D., Poblete-González, C., Cortés-Aranda, J., Godfrey, L., & Orellana-Silva, N. (2024). Land-Use Impacts on Soil Erosion: Geochemical Insights from an Urban Drinking Catchment, South-Central Chile. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w16223246>.

⁷⁰ Lara, A., Jones, J., Little, C., & Vergara, N. (2021). Streamflow response to native forest restoration in former Eucalyptus plantations in south central Chile. *Hydrological Processes*, 35(8), e14270. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/hyp.14270>

plantaciones también puede contribuir a aumentar los volúmenes de escorrentía.⁷¹ Las anchuras adecuadas de las zonas de amortiguamiento varían en función de la pendiente, los tipos de suelo, el uso del suelo y otras variables. Por ejemplo, en Oregón, las normativas forestales generalmente exigen conservar la vegetación en un radio de 23 metros de los arroyos, estableciendo requisitos de distancia mayores para los humedales, los estuarios y ciertos tipos de cursos de agua.^{72,73}

Esta opción tendría un impacto bajo en la comunidad, pero podría tener cierto impacto en las empresas forestales, los empleos en la cosecha forestal y la disponibilidad de tierras para pastizales.

6.1.4 Mejora de la gestión y el tratamiento de las aguas residuales

Con el fin de abordar el flujo de nutrientes y patógenos hacia el lago asociado con las aguas residuales:

- Es necesario ampliar el servicio de alcantarillado para que más viviendas y otros edificios que actualmente no están conectados a la red de alcantarillado pasen a estarlo.
- Las tuberías de aguas residuales existentes y demás infraestructura deben inspeccionarse periódicamente para detectar fugas y otras necesidades de mantenimiento.
- Los métodos de tratamiento de aguas residuales en las plantas existentes podrían mejorarse para reducir las concentraciones de nutrientes en los efluentes. Contar con un tratamiento secundario eficaz y añadir un tratamiento terciario (incluyendo humedales de tratamiento) reduciría drásticamente las concentraciones de nutrientes en los efluentes de las plantas de tratamiento.
- Los efluentes tratados podrían utilizarse en tierras agrícolas, plantaciones o proyectos de paisajismo, logrando así una eliminación adicional de nutrientes y reduciendo, al mismo tiempo, la demanda de fertilizantes y de otras fuentes de agua dulce.
- Las descargas de las plantas de tratamiento podrían desviarse completamente fuera de la cuenca y verterse directamente en el océano. Si bien esta medida eliminaría una fuente de nutrientes que ingresan al lago, también reduciría una fuente potencialmente importante de aportes de agua dulce tanto para la cuenca, el lago como para el

⁷¹ Little, C., Cuevas, J. G., Lara, A., Pino, M., & Schoenholtz, S. (2015). Buffer effects of streamside native forests on water provision in watersheds dominated by exotic forest plantations. *Ecohydrology*, 8(7), 1205-1217. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eco.1575>

⁷² Oregon Department of Forestry. Chapter 629 Division 643 Water Protection Rules: Vegetation Along Streams. <https://secure.sos.state.or.us/oard/displayDivisionRules.action?selectedDivision=7424>

⁷³ Oregon Department of Forestry. Chapter 629 Division 645 Water Protection Rules: Riparian Management Areas and Protection Measures for Significant Wetlands. <https://secure.sos.state.or.us/oard/displayDivisionRules.action?selectedDivision=2873>

estuario. Además, es posible que estas descargas reubicadas requieran, aun así, someterse a un tratamiento mejorado para cumplir con las normativas vigentes para los vertidos en el océano.

La eliminación de nutrientes por parte de las plantas compactas de tratamiento de aguas residuales de lodos activados —utilizadas en la cuenca hidrográfica— puede variar considerablemente en función de la calidad de su mantenimiento y operación, así como de si fueron diseñadas específicamente para la eliminación de nitrógeno y fósforo. Afortunadamente, es posible adaptar estas plantas mediante sistemas modulares para mejorar la eliminación de nutrientes.^{74,75}

Dos ejemplos de tecnologías que pueden incorporarse a plantas existentes son los biorreactores de membrana (MBR) y los biorreactores de biopelícula de lecho móvil (MBBR). Ambas tecnologías emplean la aireación y el tratamiento biológico para eliminar nutrientes de las aguas residuales, pero difieren en cuanto a costos, mantenimiento, necesidades energéticas y capacidades de eliminación de nutrientes.⁷⁶

Si bien ampliar y mejorar la infraestructura de tratamiento de aguas residuales puede resultar costoso, puede ofrecer múltiples beneficios en términos de salud pública, recreación y calidad del agua.

6.2 Eliminación y remediación de nutrientes en el lago

6.2.1 Aireación / Oxigenación

La aireación u oxigenación puede mejorar la calidad del agua de un lago de múltiples maneras, al favorecer la mezcla y aumentar los niveles de oxígeno disuelto. Unos niveles más elevados de oxígeno disuelto en las zonas más profundas del lago y en el lecho lacustre pueden reducir la liberación de nutrientes desde los sedimentos. Por su parte, la mejora de los niveles de oxígeno disuelto en la columna de agua puede disminuir la disponibilidad de nitrógeno para la proliferación de algas, al promover la conversión de amoníaco, nitrito y nitrato en nitrógeno gaseoso que se libera a la atmósfera. Asimismo, la aireación puede mejorar la claridad del agua y el hábitat de los peces, al tiempo que reduce los problemas de olores. La aireación puede llevarse a cabo en la superficie, de forma sumergida o mediante el uso de nanoburbujas, y puede emplear aire u oxígeno puro. Cada una de estas opciones conlleva diferentes beneficios,

⁷⁴ Díaz, M. A., Blanco, D., Chandia-Jaure, R., Lobos Calquin, D., Decinti, A., Naranjo, P., & Almendro-Candel, M. B. (2024). Excess of Nutrients in Prefabricated or Compact Wastewater Treatment Plants: Review, Solution Alternative, and Modeling for Verification. *Water*, 16(10), 1354. <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/10/1354>

⁷⁵ Optimizing Nutrient Removal in Activated Sludge Wastewater Treatment Plants. <https://www.epa.gov/compliance/optimizing-nutrient-removal-activated-sludge-wastewater-treatment-plants>

⁷⁶ Biological Removal Systems. <https://www.frcsystems.com/products/biological>

costos y desafíos.^{77,78,79,80} Estas técnicas generalmente implican el bombeo continuo de aire, oxígeno o agua, y requieren acceso a la electricidad. Aumentar la mezcla en el lago podría ayudar a reducir la salinidad del fondo al expulsar sales gradualmente. Sin embargo, la aireación también podría elevar la temperatura del agua en las zonas más profundas, perjudicando potencialmente a cualquier especie que dependa de aguas más frías, en caso de estar presente. Existen diversas técnicas disponibles para aumentar los niveles de oxígeno disuelto en las capas inferiores de los lagos, las cuales pueden limitar o facilitar dicha mezcla. Para mantener los beneficios en la calidad del agua, es probable que las iniciativas de aireación deban ser continuas y a largo plazo. Aun si se redujera drásticamente el flujo de nutrientes hacia el lago, podrían liberarse los nutrientes residuales acumulados en los sedimentos del lago hacia la columna de agua si se interrumpieran las labores de aireación. Es posible que la aireación pueda ajustarse con base en un monitoreo minucioso de las condiciones del lago. Los diseños y cronogramas de aireación deben tomar en cuenta los resultados de los estudios sobre nutrientes, hidrodinámica y calidad del agua, y deben definirse en consulta con expertos en la mejora de la calidad del agua en lagos.

Esta opción tendría un impacto bajo en la comunidad y podría generar efectos positivos notables en la calidad del agua en un plazo más breve que la mayoría de las demás opciones, siempre que se limite el ingreso de nutrientes al sistema.

6.2.2 Aditivos para el control de nutrientes

Aditivos como la arcilla bentonita modificada con lantano (Phoslock o EutroSORB) o el sulfato de aluminio (alumbre) podrían ayudar a fijar el fósforo presente en la columna de agua y en los sedimentos del lago, inmovilizándolo dentro de estos últimos. Dependiendo del producto utilizado, de los niveles continuos de fósforo que ingresan al lago y de otros enfoques de mejora de la calidad del agua que se estén aplicando, podría ser necesario volver a aplicar estos aditivos periódicamente a lo largo del tiempo para mantener su eficacia.

Esta opción tendría un impacto bajo en la comunidad y podría generar efectos positivos notables en la calidad del agua en un plazo mucho más breve que otras alternativas.

⁷⁷ Illinois Environmental Protection Agency. 1997. Lake Aeration and Circulation.

<https://epa.illinois.gov/content/dam/soi/en/web/epa/documents/water/conservation/lake-notes/lake-aeration.pdf>

⁷⁸ Beutel, M. W., & Horne, A. J. (1999). A review of the effects of hypolimnetic oxygenation on lake and reservoir water quality. *Lake and Reservoir Management*, 15(4), 285-297.

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07438149909354124>

⁷⁹ Investigation and discussion of techniques for hypolimnion aeration/oxygenation. <https://erdc-library.erdc.dren.mil/items/81b728f7-6251-4ef8-e053-411ac80adeb3>

⁸⁰ Nanobubble Technology. <https://www.solitudelakemanagement.com/ultra-fine-nanobubble-technology/>

Phoslock

Phoslock es una arcilla bentonita modificada con lantano. Según la ficha técnica de Phoslock:⁸¹

Su ingrediente activo, el lantano, posee una fuerte afinidad (1:1 molar) para unirse al fosfato, que es la forma soluble del fósforo. A diferencia de otros métodos, Phoslock® no pierde su capacidad de unión con el paso del tiempo. La unión entre el lantano y el fosfato da lugar a la formación de un mineral insoluble, la rhabdofana, que no libera el fosfato de vuelta a la columna de agua una vez que este se ha fijado.

Phoslock fija el fósforo de forma permanente, atrapándolo en los sedimentos del lecho del lago; sin embargo, una vez saturados sus sitios de fijación, no puede fijar fosfato adicional.⁸² Si continúan produciéndose aportes de fósforo al lago, podrían requerirse tratamientos adicionales en el futuro.

Según «Una visión general de Phoslock y su uso en entornos acuáticos»:⁸³

«Phoslock no se considera peligroso según la Norma de Comunicación de Peligros (29CFR 12910.1200) de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA). El lantano y la arcilla utilizados en su formulación no figuran en el inventario de la Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA) de la USEPA».

«Phoslock representa un riesgo de insignificante a muy bajo para el medio acuático, al tiempo que ofrece una gran afinidad para fijar y eliminar el fósforo, lo cual se traduce en mejoras en la calidad del agua. Un análisis de los datos de toxicidad ha revelado un amplio margen de seguridad tanto para los organismos acuáticos como para los seres humanos que pudieran entrar en contacto con aguas tratadas con Phoslock, tanto durante la aplicación como posteriormente».

EutroSORB

EutroSORB ofrece productos similares a Phoslock, pero con componentes adicionales no revelados capaces de actuar sobre el fósforo en aguas corrientes, columnas de agua lacustre o sedimentos.⁸⁴

⁸¹ Phoslock Technical Information Sheet. https://phoslockusa.com/wp-content/uploads/2026/01/PHOSLOCK_TECHSHEET.pdf.

⁸² Phoslock website. <https://phoslockusa.com/>

⁸³ An Overview of Phoslock and Use In Aquatic Environments. https://www.petwatersolutions.com/wp-content/uploads/2021/10/1539_01.pdf

⁸⁴ EutroSORB. <https://eutrosorb.com/>

Alumbre

Según la Hoja informativa sobre el alumbre del Departamento de Recursos Naturales de Wisconsin:⁸⁵

«El alumbre (sulfato de aluminio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, o hexahidrato de aluminio, $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$) es un material utilizado en una variedad de aplicaciones, desde la elaboración de productos de panadería hasta el tratamiento de agua potable. En la gestión de lagos, el alumbre se emplea para desactivar la carga interna —o el ciclo— del nutriente fósforo que se ha acumulado en los sedimentos del lago. En algunas situaciones, el alumbre se utiliza para tratar el flujo entrante proveniente de los sistemas de alcantarillado pluvial y de otras fuentes externas. El alumbre puede aplicarse en estado líquido o sólido. A menudo se aplica un amortiguador (aluminato de sodio, $\text{Na}(\text{AlO}_2)$) conjuntamente con el alumbre para estabilizar el pH.»

«El alumbre se utiliza principalmente para controlar este ciclo interno del fósforo proveniente de los sedimentos del fondo del lago; es posible que no resulte eficaz para reducir el fósforo a largo plazo en cuerpos de agua que presentan cargas externas continuas y elevadas de este nutriente.»

«El alumbre se ha utilizado para reducir la carga interna de fósforo en los lagos durante más de 50 años. Por lo general, los tratamientos dan como resultado una reducción promedio de la carga interna de fósforo de entre el 60% y el 90%, con una duración de entre cinco y 20 años. La restauración de lagos deteriorados o eutrofizados puede requerir una reducción del 80% o más en las cargas internas de fósforo; por ello, podrían ser necesarias aplicaciones repetidas para alcanzar los objetivos de gestión.»

«No existen restricciones posteriores al tratamiento en cuanto al uso del agua tratada para actividades como la natación, la pesca, el consumo humano o el riego.»

Comparación entre Phoslock y alumbre

Es probable que la aplicación de alumbre resulte mucho más económica que la de Phoslock; sin embargo, podría requerir una aplicación más frecuente y tal vez no sea tan estable como Phoslock ante una amplia gama de parámetros de calidad del agua. Asimismo, dado que actúa como floculante, haciendo que las partículas en suspensión se aglomeren y se hundan, el alumbre puede favorecer la sedimentación de las algas fuera de la columna de agua, lo que conduce a una mejora más rápida en la claridad del agua; no obstante, los sedimentos tratados con Phoslock podrían ser más estables y menos propensos a la resuspensión. Por consiguiente, podría resultar beneficioso utilizar ambos productos: aplicar primero el alumbre para eliminar las algas y el fósforo de la columna de agua, y posteriormente Phoslock (o EutroSORB) para fijar

⁸⁵ Wisconsin Department of Natural Resources, Alum Chemical Fact Sheet.

<https://apps.dnr.wi.gov/swims/Documents/DownloadDocument?id=330737926>

el fósforo en el sedimento. Ambos tratamientos requerirían aplicaciones reiteradas si persistieran los elevados aportes de fósforo al lago.

6.2.3 Dragado

Dependiendo de los resultados del estudio detallado de nutrientes e hidrodinámica, el dragado podría constituir una solución útil a implementar. El dragado a gran escala del lago permitiría eliminar físicamente los sedimentos cargados de nutrientes —que constituyen un importante reservorio y fuente de nutrientes que ingresan en la columna de agua—, así como otros contaminantes presentes en el lago; asimismo, ayudaría a restablecer el perfil de profundidad del lago y el estuario a un estado más cercano al que tenía antes de que comenzaran la deforestación a gran escala y la sedimentación. El dragado puede resultar costoso, destructivo para los hábitats existentes y causar graves perturbaciones en la calidad del agua y en el uso del lago mientras se lleva a cabo. Las opciones para la reutilización de los sedimentos dragados dependerán de los niveles de nutrientes y otros contaminantes que estos contengan; no obstante, podría ser necesario secarlos y transportarlos a un vertedero.

Dados estos impactos, el dragado debe considerarse una solución de emergencia —de uso excepcional— que sirva de apoyo a otros esfuerzos destinados a mejorar y proteger la calidad del agua del lago en el futuro.

Esta opción tendría repercusiones notables para la comunidad en términos de costos, ruido, degradación temporal de la calidad del agua a corto plazo, tráfico de camiones y olores.

6.2.4 Restauración y mejora de humedales, y humedales artificiales

Gran parte de la zona ribereña del lago ha sido alterada para dar cabida a muelles, jardines, canales de navegación y otras infraestructuras, lo cual ha reducido la superficie de vegetación de humedal en los márgenes del lago. Los humedales proporcionan un hábitat valioso y servicios ecosistémicos, entre los que se incluyen la prevención de la erosión ribereña, la retención de sedimentos, la absorción de nutrientes, el aporte de sombra y la liberación de sustancias que limitan el desarrollo del fitoplancton, además de impedir la resuspensión de sedimentos y la turbidez provocada por el viento.⁸⁶ La vegetación de humedal restaurada o añadida cerca de las entradas al lago puede ayudar a reducir la velocidad del agua y a sedimentar, mientras que la restauración y mejora de la vegetación de humedal en la orilla del lago mejora la eliminación de nutrientes y crea un hábitat natural para la fauna silvestre. Los humedales flotantes con esteras artificiales no requieren preparación del terreno ni del sitio y pueden ayudar a eliminar nutrientes, además de proporcionar hábitat para la fauna silvestre, aunque pueden requerir más mantenimiento que los humedales en tierra. Los humedales de

⁸⁶ Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. 2008. Evaluación Limnológica General del Lago Vichuquén. Informe técnico. Universidad de Concepción, Concepción.

tratamiento diseñados podrían mejorar la eliminación de nutrientes si se ubican en las entradas al lago o mediante la circulación continua de agua del lago a través de ellos. Los humedales podrían restaurarse o instalarse aguas arriba del lago, a lo largo de los cursos de agua o en las plantas de tratamiento de aguas residuales, para eliminar los nutrientes antes de que lleguen al lago.

6.3 Gestión del nivel del lago

Al igual que en el estudio sobre nutrientes, debería llevarse a cabo un estudio detallado sobre la gestión del nivel del lago y la hidrodinámica de la cuenca, contando con la participación de las partes interesadas, incluidos los gestores de la Reserva Laguna Torca. Resulta probable que —si bien ninguna estrategia de gestión logrará satisfacer a todos— las mejores estrategias para mejorar la calidad del agua en el lago, el estuario y la Laguna Torca, así como para limitar los impactos sobre la vida silvestre, impliquen minimizar o eliminar por completo las aperturas y cierres artificiales de la barra de arena, y no instalar barreras de ningún tipo entre el lago y el estuario. Dada la infraestructura existente, podría ser necesario permitir aperturas artificiales para prevenir los impactos derivados de inundaciones severas,⁸⁷ al tiempo que se elaboran planes para reubicar la infraestructura vulnerable fuera de las zonas propensas a inundarse. Las iniciativas de planificación local podrían:

- Incluir la zonificación para parques con vegetación nativa —o la creación de los mismos— en zonas propensas a inundaciones.
- Desincentivar y restringir nuevos desarrollos o el relleno de terrenos a lo largo de las riberas fluviales, las orillas de los lagos y otras zonas propensas a inundaciones.
- Elaborar estrategias para facilitar la remoción de los edificios e infraestructuras existentes en zonas propensas a inundaciones y restaurar la vegetación original.

Dada la historia del lago y los probables impactos del cambio climático, podría no resultar sensato ni factible intentar limitar las intrusiones de agua salada en el lago mediante cierres artificiales. Reducir drásticamente los aportes de nutrientes al lago desde la cuenca—así como eliminar los nutrientes presentes en los sedimentos del lecho o hacer que estos dejen de estar disponibles— contribuiría a mejorar la calidad del agua y a disminuir la frecuencia y la gravedad de las proliferaciones de algas tóxicas, incluso ante la presencia continua de agua salada en el lago. Asimismo, aumentar los aportes de agua dulce al lago, a la Laguna Torca y al estuario — mediante la reconversión de plantaciones forestales exóticas en vegetación nativa— podría ayudar a reducir la salinidad del lago y a disminuir las intrusiones de agua salada en el mismo. Al igual que en años anteriores, el canal que permitía a la Laguna Torca descargar agua hacia el

⁸⁷ Última carta: #21 Sistema de medición de Cota del agua. <https://www.ucvichuquen.cl/copia-de-boletines>

lago Vichuquén podría utilizarse para prevenir inundaciones o para contribuir a elevar los niveles de agua en la Laguna Torca.



Figura 16. Versión recortada de un mapa histórico que muestra la ubicación del canal que se abriría artificialmente entre la Laguna Torca y el Lago Vichuquén para prevenir inundaciones en las tierras bajas aledañas a Laguna Torca.

6.4 Orientación directa a algas / cianobacterias

6.4.1 Ultrasonificación

El tratamiento ultrasónico para las floraciones algales implica el despliegue de dispositivos que emiten ondas sonoras hacia el agua con el fin de perturbar o dañar las células de las cianobacterias, provocando que estas se hundan o se rompan. El ultrasonido de baja energía tiene como objetivo interferir con los mecanismos de flotabilidad de las algas, mientras que el ultrasonido de mayor potencia destruye físicamente las células. Sin embargo, esta tecnología conlleva varios inconvenientes potenciales. Una de las preocupaciones es su posible eficacia limitada en lagos complejos o turbios, como el Lago Vichuquén, dado que es posible que las ondas sonoras no logren alcanzar todas las áreas. En caso de que la tecnología resultara eficaz, la ruptura o daño de grandes volúmenes de algas tóxicas podría liberar al agua las toxinas que estas almacenan. Asimismo, el posterior hundimiento de la materia orgánica puede agotar aún más los niveles de oxígeno disuelto, lo que podría asfixiar a los peces y facilitar la liberación de

nutrientes adicionales, que son la causa fundamental de las floraciones algales, desde los sedimentos y de las algas muertas.⁸⁸

Una limitación importante del tratamiento ultrasónico es que solo aborda los síntomas, y no la causa subyacente de las proliferaciones: el aporte y la carga excesiva de nutrientes, la reducción de los aportes de agua dulce y la disminución de la mezcla y el flujo del agua. Las ondas sonoras también pueden perjudicar a organismos no objetivo que resultan cruciales para el ecosistema —tales como el zooplancton, las diatomeas y las algas verdes—, los cuales desempeñan funciones vitales en los ecosistemas lacustres costeros al constituir la base de las redes tróficas acuáticas y regular el flujo de energía. El fitoplancton —incluidas las diatomeas— está compuesto por productores primarios que transforman la luz solar en materia orgánica, sustentando así a niveles tróficos superiores, como el zooplancton, el cual, a su vez, actúa como consumidor clave al controlar la biomasa del fitoplancton.^{89 90 91} Las interacciones entre el fitoplancton y el zooplancton influyen en la estabilidad de la comunidad y en el funcionamiento del ecosistema.⁹² Las diatomeas contribuyen significativamente a la producción primaria y al ciclo de nutrientes, prosperando a menudo en sectores con cobertura de macrófitas que proporcionan diversos microhábitats beneficiosos tanto para las microalgas como para el zooplancton.⁹³ El zooplancton también desempeña un papel vital en el reciclaje de nutrientes y sirve como fuente de alimento esencial para las larvas de peces, vinculando los niveles tróficos inferiores con el reclutamiento de peces y sustentando las pesquerías.⁹⁴

Dado que el tratamiento no resuelve el problema fundamental de los nutrientes, requeriría una implementación y un mantenimiento indefinidos, lo que generaría costos continuos de energía

⁸⁸ Innovation in Lake Restoration: Literature Review. See Annex 1. Ultrasonication

https://futurelakes.eu/fileadmin/projects/futurelakes/Forms/Deliverables/D1.1_Innovation_in_lake_restoration_Literature_Review.pdf

⁸⁹ Zhang, Z., Li, H., Shen, W., Feng, K., Li, S., Gu, S., Zhou, Y., Peng, X., Du, X., He, Q., Wang, L., Zhang, Z., Wang, D., Wang, Z., & Deng, Y. (2022). The Stability of Phyto-Zooplanktonic Networks Varied with Zooplanktonic Sizes in Chinese Coastal Ecosystem. *mSystems*, 7. <https://doi.org/10.1128/msystems.00821-22>.

⁹⁰ Li, C., Feng, W., Chen, H., Li, X., Song, F., Guo, W., Giesy, J., & Sun, F. (2019). Temporal variation in zooplankton and phytoplankton community species composition and the affecting factors in Lake Taihu—a large freshwater lake in China. *Environmental pollution*, 245, 1050-1057. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.007>.

⁹¹ Abo-Taleb, H., & Khaled, M. (2018). Mapping the Different Planktonic Groups at One of the Egyptian Bays along Mediterranean Coast. *Open Access Journal*, 6. <https://doi.org/10.19080/foaj.2018.06.555697>.

⁹² Zhang, Z., Li, H., Shen, W., Feng, K., Li, S., Gu, S., Zhou, Y., Peng, X., Du, X., He, Q., Wang, L., Zhang, Z., Wang, D., Wang, Z., & Deng, Y. (2022). The Stability of Phyto-Zooplanktonic Networks Varied with Zooplanktonic Sizes in Chinese Coastal Ecosystem. *mSystems*, 7. <https://doi.org/10.1128/msystems.00821-22>.

⁹³ Celewicz-Gołdyn, S., & Kuczyńska-Kippen, N. (2017). Ecological value of macrophyte cover in creating habitat for microalgae (diatoms) and zooplankton (rotifers and crustaceans) in small field and forest water bodies. *PLoS ONE*, 12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177317>.

⁹⁴ Lomartire, S., Marques, J., & Gonçalves, A. (2021). The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment. *Ecological Indicators*, 129, 107867. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107867>.

y equipamiento. Además, múltiples estudios han revelado que el tratamiento ultrasónico en embalses no ha resultado eficaz y que la discrepancia entre los resultados de laboratorio y los obtenidos en el campo se debe, probablemente, a diferencias en la calidad del agua y en las presiones sonoras empleadas.^{95,96,97} Por lo tanto, es probable que la sonicación resulte ineficaz en el Lago Vichuquén, incluso a corto plazo; y, de ser efectiva, conlleva un riesgo significativo de causar daños ecológicos secundarios, sin ofrecer al mismo tiempo una solución a largo plazo para la crisis de calidad del agua.

6.4.2 Alguicidas

Los alguicidas son aditivos químicos —a menudo a base de cobre o peróxido— que pueden añadirse a las masas de agua para eliminar algas y cianobacterias. Al igual que la sonicación, no contribuyen a abordar las causas subyacentes del problema, pueden afectar negativamente a especies no objetivo y provocar una rápida disminución del oxígeno disuelto a medida que las algas muertas se descomponen.

7 El costo económico de la inacción

Si bien muchas de las soluciones de calidad del agua y opciones de gestión descritas anteriormente resultarían costosas de implementar, es importante tener presentes los numerosos costos de la inacción. La comparación de estos distintos costos puede ayudar a justificar la adopción de soluciones más costosas, pero de mayor alcance a largo plazo. Trasladar la infraestructura situada en las zonas de menor elevación fuera de las áreas propensas a inundaciones conlleva un costo; sin embargo, protegerlos durante las próximas décadas —a medida que aumente el nivel del mar— mediante la gestión y el mantenimiento activos de barreras artificiales que continúan perjudicando al complejo lacustre, resultaría también sumamente costoso. La implementación de soluciones destinadas a reducir los aportes de sedimentos y nutrientes al lago, así como limitar la disponibilidad de los nutrientes en la columna de agua, exigiría cambios sustanciales en la actividad forestal local. Esto podría requerir una inversión inicial para la transición hacia un modelo de gestión forestal de bosques nativos diferente, sostenible y diversificado. No abordar el problema de los nutrientes y

⁹⁵ Tischer, M. A., Murphy, K. A., Weaver, C. R., Crafton-Nelson, E., & Weavers, L. K. (2025). Sound field and water quality in reservoirs using ultrasound as a management strategy to control cyanobacteria blooms. *Journal of Environmental Management*, 380, 125057.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479725010333?via%3Dihub>

⁹⁶ Vaughan, L., Barnett, D., Bourke, E., Burrows, H., Robertson, F., Smith, B., ... & Zamyadi, A. (2023). Evaluating ultrasonicator performance for cyanobacteria management at freshwater sources. *Toxins*, 15(3), 186.

<https://www.mdpi.com/2072-6651/15/3/186>

⁹⁷ Innovation in Lake Restoration: Literature Review. Ver Annex 1. Ultrasonication

https://futurelakes.eu/fileadmin/projects/futurelakes/Forms/Deliverables/D1.1_Innovation_in_lake_restoration_Literature_Review.pdf

grandes cantidades de sedimentos que continúan ingresando al sistema lacustre mediante el proceso de erosión tendría repercusiones significativas en la salud de la comunidad y en el sector turístico.

Numerosos estudios demuestran que el deterioro de la calidad del agua puede repercutir negativamente en el crecimiento económico, el valor de las propiedades y las actividades recreativas y turísticas, mientras que las mejoras en dicha calidad suelen generar beneficios económicos considerables.⁹⁸ Entre los mecanismos involucrados se incluyen tanto los efectos directos (por ejemplo, la depreciación del valor de las propiedades debido a la escasa transparencia del agua o a la contaminación) como los efectos indirectos (por ejemplo, la disminución de los ingresos derivados de la recreación y el turismo a consecuencia de la proliferación de algas nocivas).

Dos estudios globales analizan la relación entre la calidad del agua y el crecimiento económico. Ambos estudios concluyeron que la mala calidad del agua reduce significativamente el crecimiento económico. El primer estudio utilizó datos de 177 países y halló que la calidad del agua y el PIB per cápita presentan una relación en forma de U invertida.⁹⁹ Esto significa que los ingresos y la contaminación del agua aumentan de manera simultánea hasta cierto punto; sin embargo, los ingresos experimentan un rápido retroceso una vez que la contaminación supera un determinado límite —un límite que, según señalan, la mayoría de los países ya han excedido—. El segundo estudio, que abarca 17 países —incluyendo varios de América del Sur—, corrobora este hallazgo, centrándose en la contaminación fluvial con el fin de aislar una relación causal entre la calidad del agua y la actividad económica.¹⁰⁰ Aunque este estudio excluyó los lagos, los tipos de impactos económicos asociados a la mala calidad del agua —tales como las pérdidas en la pesca, el turismo y las oportunidades recreativas— son aplicables a los cuerpos de agua en general.

⁹⁸ Moore, M. R., Doubek, J. P., Xu, H., & Cardinale, B. J. (2020). Hedonic Price Estimates of Lake Water Quality: Valued Attribute, Instrumental Variables, and Ecological-Economic Benefits. *Ecological Economics*, 176, 106692. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106692>; Russ, J., Zaveri, E., Desbureaux, S., Damania, R., & Rodella, A.-S. (2022). The impact of water quality on GDP growth: Evidence from around the world. *Water Security*, 17, 100130. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100130>; Dodds, W. K., Bouska, W. W., Eitzmann, J. L., Pilger, T. J., Pitts, K. L., Riley, A. J., Schloesser, J. T., & Thornbrugh, D. J. (2009). Eutrophication of U.S. Freshwaters: Analysis of Potential Economic Damages. *Environmental Science & Technology*, 43(1), 12–19. <https://doi.org/10.1021/es801217g>; El Khanji, S., & Hudson, J. (2016). Water utilization and water quality in endogenous economic growth. *Environment and Development Economics*, 21(5), 626–648. <https://doi.org/10.1017/S1355770X16000061>; Gourevitch, J. D., Koliba, C., Rizzo, D. M., Zia, A., & Ricketts, T. H. (2021). Quantifying the social benefits and costs of reducing phosphorus pollution under climate change. *Journal of Environmental Management*, 293, 112838. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112838>.

⁹⁹ El Khanji & Hudson, 2016. Water utilization and water quality in endogenous economic growth

¹⁰⁰ Russ et. al., 2022. The impact of water quality on GDP growth.

Una de las formas más significativas en que los problemas de calidad del agua repercuten en la economía es a través de la disminución del valor de las propiedades. Un estudio de 2009, ampliamente citado, investigó el impacto económico de la eutrofización en las aguas dulces de los Estados Unidos.¹⁰¹ El estudio reveló que las propiedades situadas a orillas de los lagos presentaban un valor inmobiliario significativamente inferior a medida que disminuía la claridad del cuerpo de agua, y que los usuarios del agua eran menos propensos a nadar, navegar o pescar durante los episodios de proliferación de algas. Este hallazgo se mantiene constante en toda la literatura económica. A la caída del valor de las propiedades se suman las reducciones en el uso recreativo y en los ingresos derivados del turismo. La proliferación de algas, la contaminación bacteriana, el deterioro de la calidad del agua y las percepciones de riesgo para la salud asociadas a estos factores provocan una disminución de las visitas recreativas y del gasto turístico en las comunidades que dependen de esta actividad.¹⁰²

¹⁰¹ Dodds et. al. 2009. Eutrophication of U.S. Freshwaters.

¹⁰² Gourevitch et. al. 2021. Quantifying the social benefits and costs of reducing phosphorus pollution under climate change