



DEPARTAMENTO DE ECONOMÍA AMBIENTAL – MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE

ANÁLISIS GENERAL DEL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DEL ANTEPROYECTO DE PLAN DE DESCONTAMINACION AMBIENTAL DEL LAGO VILLARRICA.

Mayo 2020

Presentación

El presente documento corresponde al Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) del Anteproyecto del Plan de Descontaminación Ambiental para la cuenca del lago Villarrica (PDAV), para los parámetros Clorofila "a", transparencia y Fósforo Disuelto. Este plan ha sido propuesto por el Departamento de Ecosistemas Acuáticos (DE) del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y la Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) del Medio Ambiente de la región de La Araucanía. En este documento se evalúa la reducción de emisiones debido a la implementación de las medidas definidas en el Anteproyecto del PDAV, así como los costos y beneficios asociados al cumplimiento normativo.

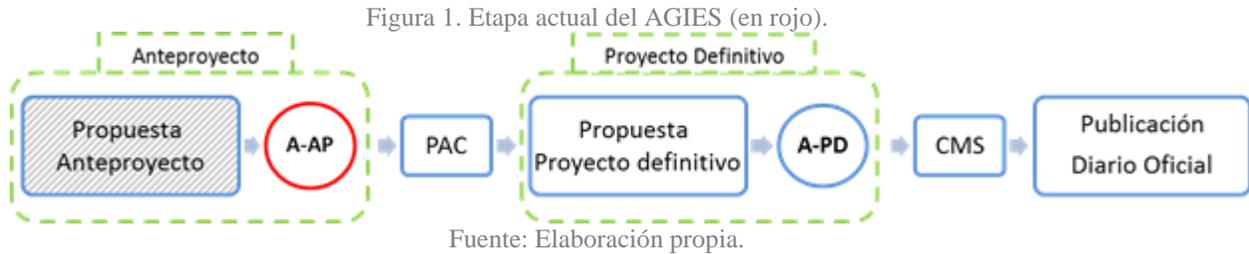
El MMA es el encargado de coordinar el diseño y establecimiento de Normas de Calidad Primarias (NPCA) y Secundarias (NSCA) y las Normas de Emisión (NE), así como Planes de Descontaminación y Prevención Ambiental (PPDA). De acuerdo a lo establecido en la Ley N°19.300 y en el Reglamento para la dictación de Planes de Prevención y de Descontaminación (D.S. N° 39/2012 del Ministerio de Medio Ambiente, MMA, 2013a), se requiere de un AGIES de las propuestas normativas que sirva como apoyo al proceso de toma de decisión. Esta tarea recae en el Departamento de Economía Ambiental (DEA) del MMA y aporta con información para la toma de decisión en las etapas de participación ciudadana y el pronunciamiento del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad (CMS).

El proceso de elaboración del AGIES de un PDA, desde el desarrollo del anteproyecto hasta su aprobación, contempla la elaboración de dos documentos:

- AGIES del Anteproyecto (A-AP), para apoyar el proceso de participación ciudadana.
- Actualización de costos y beneficios para el Proyecto Definitivo (A-PD), que corresponde a una actualización de los valores del AGIES del Anteproyecto, según los cambios establecidos después del proceso de participación ciudadana, de tal forma de apoyar al CMS en la toma de decisión.

El presente documento corresponde a la elaboración del AGIES del Anteproyecto, Figura 1. Etapa actual del AGIES (en rojo). del PDAV. En este documento se estiman los costos y

beneficios cuantificables y, según la información disponible por el MMA a la fecha de evaluación.



Nota: A-AP=AGIES Anteproyecto, PAC=Participación Ciudadana, A-PD=Actualización AGIES Proyecto Definitivo, CMS=Consejo de Ministros para la Sustentabilidad

Es importante recalcar que los resultados del AGIES intentan orientar a los tomadores de decisiones mediante el uso de la metodología aquí planteada, sin embargo, no debe ser considerada como el único criterio para la aprobación de una política pública (Arrow et al., 1996; Lave & Gruenspecht, 1991; Wegner & Pascual, 2011). Esta debe tener una visión integral, multidimensional, que incorpore otras variables tales como consideraciones culturales de la zona regulada, aspectos sociales, condiciones climáticas, políticas de Estado, desarrollo regional, macro-políticas de desarrollo sustentable (i.e. Objetivos de Desarrollo Sustentable), entre otras.

Resumen

El presente documento presenta los resultados del Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) del Anteproyecto del Plan de Descontaminación Ambiental para las aguas continentales del Lago Villarrica (PDAV). El objetivo del PDAV es reducir la concentración de los contaminantes que han superado los valores definidos en el DS N° 19/2013 del Ministerio del Medio Ambiente, publicado en el Diario Oficial con fecha 16 de octubre de 2013, que aprueba las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales del lago Villarrica (NSCA del lago Villarrica) (MMA, 2013). El D.S. N° 43/2018 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2018) declaró a la cuenca del Lago Villarrica saturada para los parámetros Clorofila “a”, transparencia y Fósforo Disuelto. Para Clorofila “a” existe saturación en todas las áreas de vigilancia, tanto para el criterio promedio anual como para valor máximo en los períodos 2014-2015 y 2015-2016. Para transparencia en el área de Vigilancia (AV) Centro del lago (Pelagial), se superó el promedio anual para dos periodos 2014-2015 y 2015-2016. Finalmente, para Fósforo Disuelto se observó saturación en las seis áreas de vigilancia del lago para el período 2015-2016 (ver MMA, 2013).

Respecto de las características de las emisiones en la cuenca, es relevante señalar que existen aportes significativos, tanto de fuentes puntuales, como de fuentes difusas. Las principales fuentes puntuales corresponden a pisciculturas, plantas de tratamiento de aguas servidas y a la emisión directa del alcantarillado del sector de Curarrehue (río Trancura). Los aportes de fuentes difusas corresponden a procesos de precipitación-escorrentía desde suelos con coberturas de vegetación natural y el sector silvoagropecuario y la emisión por sector residencial sin conexión al alcantarillado los que generan aportes de nutrientes por infiltración al suelo (fosas sépticas y pozos negros). Consecuentemente, las medidas de reducción de emisiones propuestas en el Anteproyecto han sido diseñadas con énfasis en dichos sectores. El AGIES evalúa las siguientes medidas con potencial de reducir emisiones (i) norma de emisión por carga para pisciculturas, (ii) implementación de una planta de tratamiento de aguas servidas para Curarrehue, con su respectiva norma de emisión (iii) instalación de alcantarillado/conexión para la zona sur del lago (iv) reforestación con especies nativas en franjas riparianas (bordes de cauces) y áreas con alto potencial de erosión (v) Conexión a alcantarillado para aquellas viviendas que enfrentan red, (vi) soluciones sanitarias para conjunto de viviendas rurales. Adicionalmente, se evalúan dos medidas para las cuales no existen reducciones de emisiones, pero implican costos para su implementación. La primera tiene que ver con el aumento en la frecuencia de monitoreos de calidad del agua tanto para el espejo de agua como para la cuenca aportante; la segunda corresponde a la ampliación de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Villarrica, para cumplir la norma de emisión propuesta y tratar las aguas de las nuevas conexiones a efectuar. Existen otras medidas que no son cuantificadas en el AGIES, o aquellas que no poseen reducciones de emisiones directas (por ejemplo, educación ambiental).

El supuesto utilizado, tanto para el diseño de la norma como para el presente AGIES, considera a Fósforo total como “Nutriente Limitante”. Esto quiere decir que este nutriente controla el crecimiento de poblaciones biológicas de manera casi independiente de la concentración de otros nutrientes (Correll, 1999). Por lo tanto, al cumplir los niveles

impuestos por la NSCA para Fósforo total, se cumplirán los límites para el resto de los parámetros anteriormente descritos. Además, el cumplimiento normativo se evalúa considerando el área de vigilancia denominada Zona Centro o Pelagial, ya que posee una mayor representatividad de superficie en el lago, refleja de mejor manera el funcionamiento natural del lago desde el punto de vista hidráulico, geológico, natural y temporal y es el área de vigilancia que posee los límites normativos más estrictos.

Adicionalmente, para el análisis de los efectos de las medidas en el lago, se consideró el tiempo de respuesta del lago, el cual es expresado como el tiempo en que la emisión generada en un año, se ve reflejada la concentración en el lago (ver capítulo 2.3.1) y ha sido estimado en 3 años.

A partir de la evaluación del PDAV, se obtienen los siguientes resultados, para un horizonte de evaluación de 15 años (2021-2035)¹:

- Las medidas de reducción de emisiones propuestas en el Anteproyecto permitirían cumplir la NSCA para Fósforo Total (Figura A y Figura B), Fósforo Disuelto, Clorofila “a” y Transparencia.
- La reducción de emisiones al año 2035, señala que la medida del plan asociada al sector de pisciculturas alcanza un 87,95% de la reducción en la concentración de Fósforo Total para la Zona Pelagial en el lago (Tabla A) con respecto al Inventario de Emisiones del año base 2017.
- Los beneficios valorizados se estiman en US\$ 1.892 millones, en valor presente² (Tabla C). Estos beneficios son atribuibles a la disposición a pagar (DAP) a nivel nacional para valores de uso y de no uso del Lago, dado el cumplimiento de los límites normativos establecidos en la NSCA del Lago Villarrica (desde el año 2027 al año 2035).
- Los costos asociados a la implementación del plan ascienden a US\$ 104,15 millones de dólares en valor presente (ver Tabla B) y se descomponen en 16,54% de costos para el Estado y 83,46% de costos para agentes privados (ver Tabla 9 en capítulo 3.2.1.).
- La razón beneficio costo es de 18,18 veces los beneficios por sobre los costos. Por su parte, el beneficio neto del plan se estima en US\$ 1.789 millones, lo que sugiere una alta rentabilidad social asociada a la implementación del plan.

El análisis concluye que el PDA del Lago Villarrica, junto con propiciar el cumplimiento de las normas vigentes del Estado de Chile, es consistente con los compromisos del Ministerio de Medio Ambiente al crear instrumentos que disminuyan la contaminación y que promuevan la protección de la biodiversidad y los ecosistemas

¹ El periodo de evaluación considera 15 años desde la entrada en vigencia del plan, la que se asume a partir de 2021.

² Valor del dólar corresponde a 718.33 pesos, según promedio móvil entre febrero 2019 y febrero 2020.

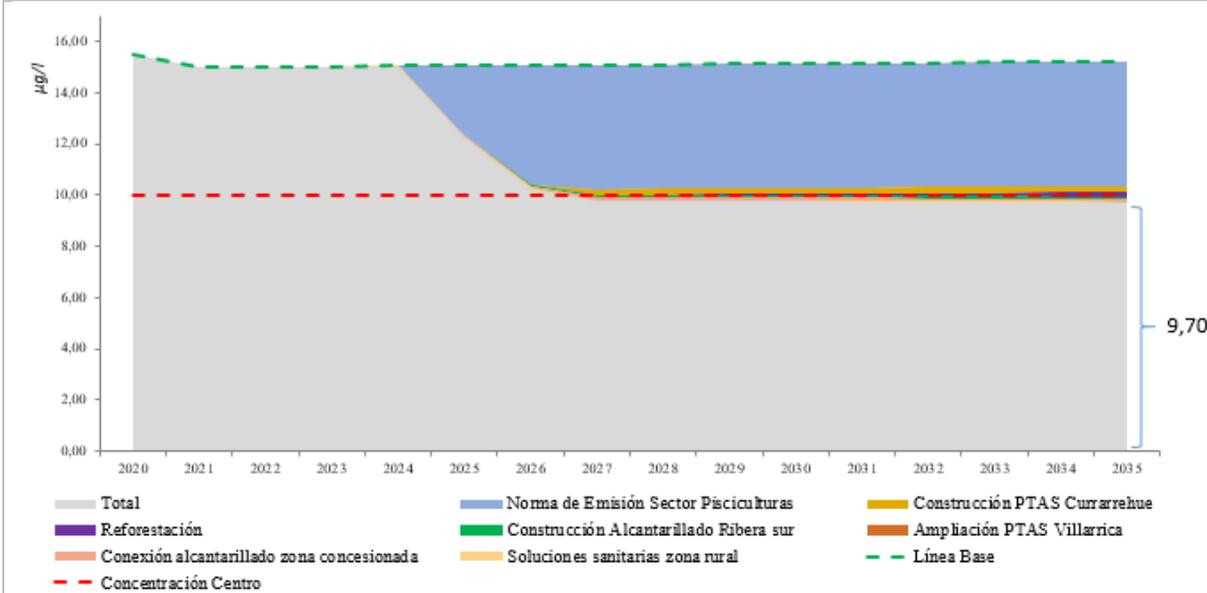


Figura A: la reducción en concentración promedio anual para Fósforo total alcanza el objetivo propuesto por la NSCA Para el lago Villarrica en la zona Pelagial, el cual es menor a los 10 µg/l ($\leq 0,010$ mg/l) a partir del año 2027.

El conjunto de medidas con mayor reducción corresponde a la Norma de Emisión para el Sector Pisciculturas (87,95%), seguido de la Construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas para Curarrehue (4,17%), posteriormente la implementación de Reforestación (3,34%) la conexión al alcantarillado de viviendas en zona concesionada (1,98%), la Construcción de alcantarillado para la ribera sur del lago (1,66%) y finalmente la medida de soluciones sanitarias para áreas rurales (0.9%).

Con estas reducciones, el lago en la zona Pelagial con el PDAV en plena implementación (año 2035), alcanzaría una concentración promedio estimada en 9,70 µg/l. Esto implica que se reestablecerían los límites definidos en la NSCA.

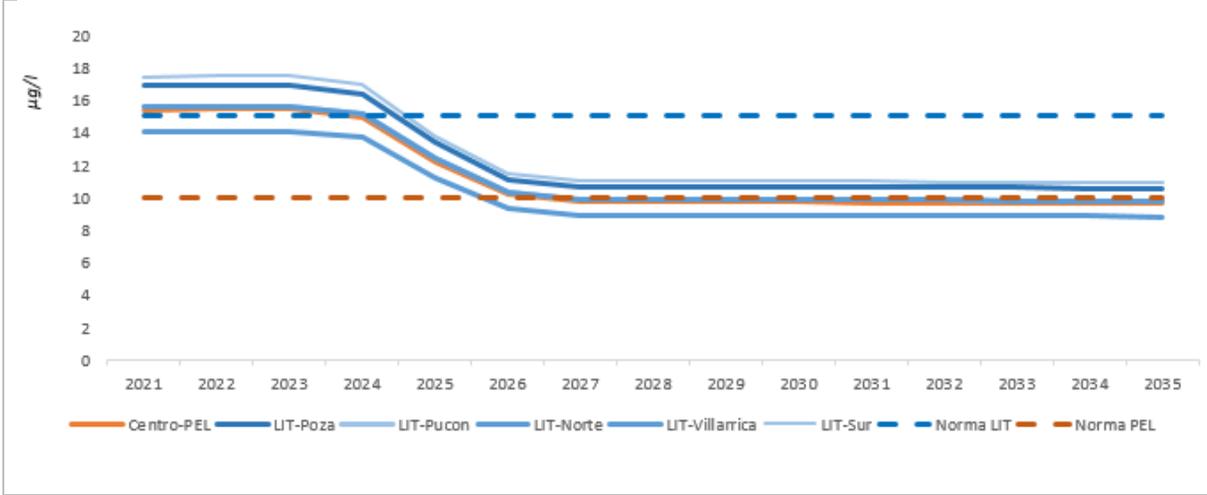


Figura B: La reducción en concentración anual para Fósforo total en todas las áreas de vigilancia alcanza los objetivos impuestos para la NSCA (10 µg/l para el área de vigilancia Pelagial y 15 µg/l para las áreas del litoral). El cumplimiento se genera entre los años 2024 y 2025 para todas las áreas de vigilancia de la zona litoral y en el año 2027 para la zona Pelagial. La concentración de Fósforo total mantiene su cumplimiento durante todo el período de evaluación.

En distintas tonalidades de color celeste se presentan las concentraciones asociadas a cada AV de la zona litoral; el límite normativo para estas áreas se presenta en una línea discontinua color azul. Para la zona Pelagial del lago su concentración se representa mediante una línea continua de color naranja y su límite normativo se representa a través de la línea discontinua del mismo color.

Sector del inventario	Medida Evaluada	Línea base 2035		Reducciones año 2035	
		Emissiones [ton/año]	Porcentaje emisiones línea base	Δ Emisiones [ton/año]	Δ porcentual de reducción Emisiones
Pisciculturas	Norma de Emisión sector Pisciculturas	106,01	35,5%	95,45	86,73%
Planta de tratamiento Pucón	No cuenta con medida	4,01	1,3%	0,00	0,00%
Alcantarillado Curarrehue	Construcción PTAS Curarrehue	5,01	1,7%	4,51	4,10%
Coberturas de uso de suelo antrópico	Reforestación	34,00	11,4%	4,79	4,35%
Coberturas de uso de suelo natural	No cuenta con medida	136,60	45,7%	0,00	0,00%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada	Conexión alcantarillado Zona Concesionada	4,23	1,4%	2,14	1,95%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde de Lago	Construcción alcantarillado Ribera Sur	1,95	0,7%	1,95	1,77%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural	Soluciones sanitarias domiciliarias rurales	7,16	2,4%	1,22	1,11%
Total		298,96	100%	110,06	100%

Tabla A: Se comparan las reducciones de cada uno de los sectores aportantes en relación a las medidas evaluadas, relacionándose la emisión de línea base y el Δ Emisión para el año 2035.

En la tabla se observa el aporte porcentual por sector, siendo los sectores que más emiten los de piscicultura (35,5% de la emisión total) y Coberturas de uso de suelo natural (45,7%). Por otra parte, se observa que la medida que logra una mayor reducción de las emisiones respecto de del total de reducciones corresponde a la medida de pisciculturas con un 86,73% otras medidas tales como la construcción de una PTAS para Curarrehue y la medida de reforestación aportan aproximadamente alrededor de un 4% cada una a la reducción total.

Tabla B: Se presentan los costos en valor presente al año 2020 en millones de dólares para cada una de las medidas implementadas en el PDAV, así como su aporte porcentual al costo total.

Se puede observar que las medidas con mayores costos corresponden a la Norma de Emisión para el sector de Pisciculturas (46,1%), seguida de la construcción del alcantarillado para la ribera sur del lago (31,8%) y la medida de reforestación alcanza con un (8,6%) de los costos del plan.

El PDAV posee un costo de US\$ 104,15 millones considerando un horizonte de evaluación de 15 años.

Tabla C: Se muestran los indicadores económicos obtenidos para el plan. Los beneficios consisten la disposición a pagar (DAP) por mantener las condiciones de calidad del lago al nivel estipulado por la NSCA. Este valor representa valores de uso y no uso del lago y considera la disposición a pagar para toda la población del país (mayores a 18 años), descontando la población que no está dispuesta a pagar (21% de la población), para el período de cumplimiento del PDAV, esto es entre el año 2027 y el año 2035 (ver figura A).

El beneficio obtenido corresponde a US\$ 1.892 millones de dólares y, comparado con los costos (razón beneficio-costos), los beneficios superan en 18,18 veces a los costos. Costos y beneficios son expresados como valor presente al año 2020

Medida Evaluada	Costos MM USD	Aporte Porcentual
Norma de Emisión sector Pisciculturas	48,01	46,1%
Construcción alcantarillado Ribera Sur	33,17	31,8%
Construcción PTAS Curarrehue	2,12	2,0%
Ampliación PTAS Villarrica	3,46	3,3%
Conexión alcantarillado Zona Concesionada	2,28	2,2%
Soluciones sanitarias domiciliarias rurales	5,54	5,3%
Reforestación	8,92	8,6%
Aumento de monitoreos	0,65	0,6%
Total	104,15	100,0%

Costos [MM USD]	Beneficios [MM USD]	Razón B/C	Beneficio total Neto [MM USD]
104,15	1.892	18,18	1.789

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES	8
1.1 INVENTARIO DE EMISIONES FÓSFORO TOTAL EN EL LAGO	8
1.2 CONCENTRACIONES EN EL LAGO.....	9
1.3 MEDIDAS EVALUADAS.....	10
2. METODOLOGÍA	12
2.1 CONCEPTUALIZACIÓN GENERAL DEL ANÁLISIS GENERAL DE IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL.....	12
2.2 LÍNEA BASE DE EMISIONES.....	13
2.3 MODELACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES	16
2.3.1 <i>Tiempo de respuesta del lago</i>	18
2.4 NUTRIENTES LIMITANTES	20
2.5 EVALUACIÓN ZONA PELAGIAL	20
2.6 EVALUACIÓN EN ÁREAS DE VIGILANCIA DEL LITORAL	20
2.7 EVALUACIÓN DE CONTAMINANTES CONSIDERADOS COMO SATURADOS.....	21
2.7.1 <i>Clorofila “a”</i>	21
2.7.2 <i>Transparencia</i>	22
2.7.3 <i>Fósforo Disuelto</i>	22
2.8 COSTOS.....	22
2.9 BENEFICIOS.....	23
3. RESULTADOS	26
3.1 EFECTOS EN EMISIONES Y CALIDAD DE LAS AGUAS DEL LAGO VILLARRICA	26
3.1.1 <i>Análisis del cumplimiento normativo para todas las áreas de vigilancia.</i>	29
3.1.2 <i>Análisis de cumplimiento normativo para Clorofila “a”</i>	29
3.1.3 <i>Análisis de cumplimiento Fósforo Disuelto.</i>	30
3.1.4 <i>Análisis de cumplimiento Transparencia.</i>	30
3.2 INDICADORES ECONÓMICOS	32
3.2.1 <i>Costos</i>	32
3.2.2 <i>Beneficios</i>	34
4. CONCLUSIONES.....	37
5. REFERENCIAS.....	38
6. ANEXOS.....	41
6.1 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN POR SECTOR.....	41
6.1.1 <i>Metodología para el sector pisciculturas</i>	41
6.1.2 <i>Metodologías para el sector Alcantarillado de Curarrehue</i>	49
6.1.3 <i>Metodología para el sector de coberturas de suelo antrópico</i>	49
6.1.4 <i>Metodología para el sector de Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde de lago.</i> 49	
6.1.5 <i>Metodología para la evaluación de costos de la PTAS de Villarrica.</i>	54
6.1.6 <i>Metodología para el sector de Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada.</i>	55
6.1.7 <i>Metodología para el sector de Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural.</i> 57	
6.1.8 <i>Metodología para la evaluación de costos por aumento en monitoreo</i>	58
6.2 FICHA DEL AGIES	60
6.3 DETALLES DE COSTOS PISCICULTURA.	61

1. Antecedentes

El Decreto Supremo N°43 de 2018 (D.S. 43/2018) del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2018), declaró Zona Saturada³ por Clorofila “a”, Transparencia y Fósforo Disuelto a la cuenca del Lago Villarrica, por lo que, mediante la Resolución Exenta N°1066 del 12 de noviembre de 2018 se da inicio al proceso de elaboración del Plan de Descontaminación Ambiental (PDA). Esta declaración, de conformidad al procedimiento y a las etapas señaladas en el artículo 44 de la ley 19.300 y en el decreto supremo N° 39 de 2012 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2012), da origen a la elaboración de un PDA para la cuenca del Lago Villarrica (en adelante PDAV). Mediante este instrumento el Estado busca resguardar los ecosistemas y la biodiversidad, recuperando los niveles de concentración para Clorofila “a”, Transparencia y Fósforo Disuelto por debajo de los límites establecidos en la normativa.

1.1 Inventario de emisiones Fósforo Total en el lago

Como antecedente y para la evaluación de AGIES del PDAV, el inventario de emisiones utilizado corresponde al presentado en Tabla 1.

Tabla 1: Inventario de emisiones PDAV año 2017.

Fuente Emisora	Tipo de Emisión	Fósforo Total [Ton/año]	Fósforo Total [%]
Pisciculturas	Puntual	115,5	38,2%
Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Pucón	Puntual	3,6	1,2%
Alcantarillado Curarrehue	Puntual	4,9	1,6%
Coberturas de suelos de uso natural de la cuenca	Difusa	136,6	45,1%
Coberturas de suelos de uso antrópico de la cuenca	Difusa	34,0	11,2%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada	Difusa	2,6	0,9%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde lago	Difusa	1,2	0,4%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural	Difusa	4,4	1,4%
Total		302,8	100,0%

Fuente: Departamento de ecosistemas acuáticos (UFRO, 2020)

El inventario de emisiones presentado fue obtenido del informe (UFRO, 2020). Las fuentes puntuales de la cuenca aportan con 124 toneladas de Fósforo total al año, esto representa un 41% de las emisiones, mientras que las fuentes difusas aportan 179 toneladas de Fósforo total al año, lo que representa un 59% de las emisiones.

En la Tabla 1 se observa que las mayores fuentes de emisión de Fósforo Total corresponden al ítem cobertura de suelos de uso natural de la cuenca (45,1% de las emisiones), el cual está relacionado a procesos de precipitación-escorrentía para suelo con coberturas tales como bosque nativo, nieves, suelos desnudos, matorral nativo, entre otros. Por otra parte, las pisciculturas son el segundo sector en generar mayor emisión, representando un 38,2%

³ Zona Saturada: Aquella en la que una o más normas de calidad ambiental se encuentran superadas.

del inventario, un tercer sector de relevancia en las emisiones corresponde a cobertura de suelo de uso antrópico de la cuenca (11,2%); este último se caracteriza por la emisión natural desde suelos con bosques naturales hacia la cuenca, otras fuentes representan porcentajes menores de aportes.

Este inventario se utilizará como base para la evaluación del PDAV, tanto para la estimación de la proyección de las emisiones, como para la estimación de las reducciones debido a la implementación de las medidas del Plan para el período de duración del PDAV (15 años), así como para la evaluación del cumplimiento normativo.

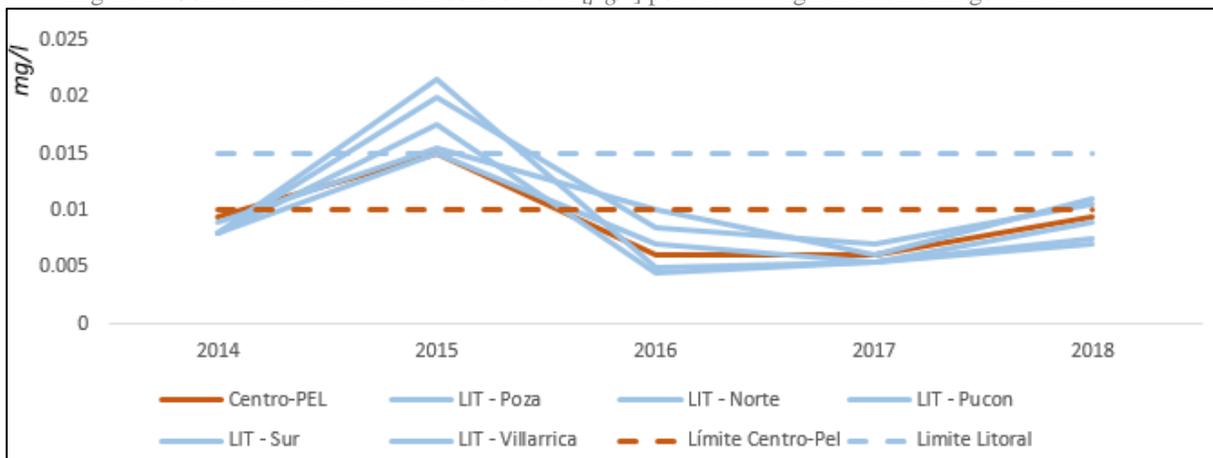
1.2 Concentraciones en el lago

La Figura 2 presenta las concentraciones medidas para el lago en el periodo comprendido entre el año 2014 a 2018 para Fósforo Total en $\mu\text{g/l}$. La data representa las concentraciones promedio consideradas desde la implementación de la NSCA del Lago Villarrica y son las utilizadas para realizar los análisis posteriores en este documento.

De la Figura 2 se desprende que existió un aumento abrupto de las concentraciones para el año 2015. Este año presenta valores en concentración que superan o están muy cercanos a superar el límite de la norma para las áreas de vigilancia del lago, y reflejan la declaración de zona para algunos contaminantes. Posterior al año 2015, las concentraciones disminuyen bajo los límites impuestos por la NSCA y esta condición se mantiene para la mayoría de las áreas de vigilancia hasta el año 2018.

Los datos para Fósforo Total medidos en el lago para los años 2014 y 2015 no fueron validados por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), razón por la cual se calcularon las concentraciones a partir de Fósforo Disuelto. Se considera que el Fósforo Disuelto (cuya medición sí ha sido validada por la SMA), es igual al Fósforo Total. Este supuesto se basa en que el Fosforo Disuelto corresponde a una parte del Fósforo Total, por ende, el Fósforo Total será al menos igual al Fósforo Disuelto, condición que define un escenario conservador de evaluación. Para los años 2016, 2017 y 2018 se utilizaron datos de Fósforo total validados por la SMA.

Figura 2: Concentración anual de Fósforo Total [$\mu\text{g/l}$] por área de vigilancia en el Lago Villarrica.



Fuente: Departamento de ecosistemas acuáticos (MMA, 2020a)

1.3 Medidas Evaluadas

En la Tabla 2: Resumen de medidas consideradas en la evaluación se muestran las medidas establecidas en el anteproyecto del plan que serán consideradas en la evaluación económica del presente AGIES.

Tabla 2: Resumen de medidas consideradas en la evaluación

Sector del inventario	Medida Evaluada	Descripción de la Medida																		
Pisciculturas	Norma de Emisión Sector Pisciculturas	Límite de emisión para Fósforo Total por tonelada de biomasa producida, la siguiente tabla presenta los límites y los plazos de implementación ⁴ de la medida:																		
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Capacidad de producción (tonbiomasa/año)</th> <th>Límite de Emisión (kgPT/año)</th> <th>Entra en vigencia⁵ para pisciculturas existentes (a partir de publicación en el diario oficial)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≤ 8</td> <td>80</td> <td>4 años</td> </tr> <tr> <td>> 8 y ≤ 151</td> <td>560</td> <td>3 años</td> </tr> <tr> <td>> 151 y ≤ 301</td> <td>1.000</td> <td>3 años</td> </tr> <tr> <td>> 301 y ≤ 500</td> <td>1.700</td> <td>2 años</td> </tr> <tr> <td>> 500</td> <td>2.100</td> <td>2 años</td> </tr> </tbody> </table>	Capacidad de producción (tonbiomasa/año)	Límite de Emisión (kgPT/año)	Entra en vigencia ⁵ para pisciculturas existentes (a partir de publicación en el diario oficial)	≤ 8	80	4 años	> 8 y ≤ 151	560	3 años	> 151 y ≤ 301	1.000	3 años	> 301 y ≤ 500	1.700	2 años	> 500	2.100	2 años
		Capacidad de producción (tonbiomasa/año)	Límite de Emisión (kgPT/año)	Entra en vigencia ⁵ para pisciculturas existentes (a partir de publicación en el diario oficial)																
		≤ 8	80	4 años																
		> 8 y ≤ 151	560	3 años																
		> 151 y ≤ 301	1.000	3 años																
> 301 y ≤ 500	1.700	2 años																		
> 500	2.100	2 años																		
Alcantarillado Curarrehue	Construcción PTAS Curarrehue	Implementación de una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) para tratar las aguas provenientes de la población urbana de la comuna de Curarrehue. La implementación de esta PTAS debe considerar el cumplimiento de una norma de emisión de 2 mg/l para Fósforo Total. La medida deberá estar en funcionamiento al tercer año desde la promulgación del PDAV.																		
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde lago	Construcción Alcantarillado Ribera Sur	Construcción de un sistema de distribución y recolección de aguas residuales, el cual a su vez deberá contar con un sistema de tratamiento de aguas servidas que abarque el área geográfica definida en el decreto de área de concesión sanitaria elaborado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), que comprende la ribera sur del Lago Villarrica, entre las ciudades de Pucón y Villarrica.																		
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada	Ampliación PTAS Villarrica	Ampliación y mejoramiento de la PTAS del centro urbano de Villarrica, para que logre el cumplimiento de una norma de emisión de 2 mg/l para Fósforo Total.																		
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada	Conexión Alcantarillado Zona Concesionada	Conexión de viviendas que enfrenten red y que no están conectadas al sistema de alcantarillado dentro de la zona concesionada de las ciudades de Pucón y Villarrica. Se espera que, al segundo año de implementación del plan, todas las viviendas se encuentren conectadas.																		
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural	Soluciones Sanitarias Zona Rural	Implementación de soluciones sanitarias para viviendas en zonas rurales que actualmente emiten a cuerpos de agua. Las soluciones sanitarias se entregarán anualmente, y contempla que la medida entregue soluciones anualmente, durante los 15 años de duración del plan.																		

⁴ Para las pisciculturas nuevas, se considera su cumplimiento desde la entrada en vigencia del PDAV.

⁵ Para efectos de este AGIES el año de entrada en vigencia del PDAV será el año 2021.

Sector del inventario	Medida Evaluada	Descripción de la Medida
Coberturas de suelos de uso antrópico de la cuenca	Reforestación	Reforestación con el fin de controlar la emisión por procesos de precipitación y escorrentía con especies nativas. La medida busca reforestar suelos con nula o baja cobertura vegetal en bordes de riberas y lagos (franjas riparianas). Se reforestarán 2.000 hectáreas.
No asociado al inventario	Aumento de Monitoreos	Red de monitoreo para la cuenca hidrográfica del lago Villarrica, la cual considerará un aumento de monitoreos para los siguientes parámetros: Caudal (m ³), Fósforo Total (PT), Fósforo Disuelto (P-PO ₄), Nitrato (N-NO ₃), Nitrito (N-NO ₂), Nitrógeno Total (NT), Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₄), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), Conductividad (uS/cm), PH, Temperatura (°C), Oxígeno Disuelto (ppm). La frecuencia de los monitoreos deberá ser trimestral.

Fuente: Elaboración propia en base al Anteproyecto del Plan de Descontaminación de la cuenca del lago Villarrica.

Cabe destacar que en el proceso de elaboración de este AGIES no se evalúan medidas para las que no hay efectos directamente cuantificables, o para las cuales no exista información sobre costos o para las que no existe información de línea base disponible, o para aquellas que no existe información para su modelación al momento del inicio de la elaboración del AGIES. Las medidas no evaluadas corresponden, en general, a las asociadas con programas de educación, campañas comunicacionales, generación de estudios y programas de capacitación.

Para todas aquellas medidas que no fueron evaluadas por falta de información, si posterior al Proceso de Participación Ciudadana (PAC) se cuenta con información que permitan su evaluación, estas serán incorporadas en la evaluación del Proyecto Definitivo del Plan.

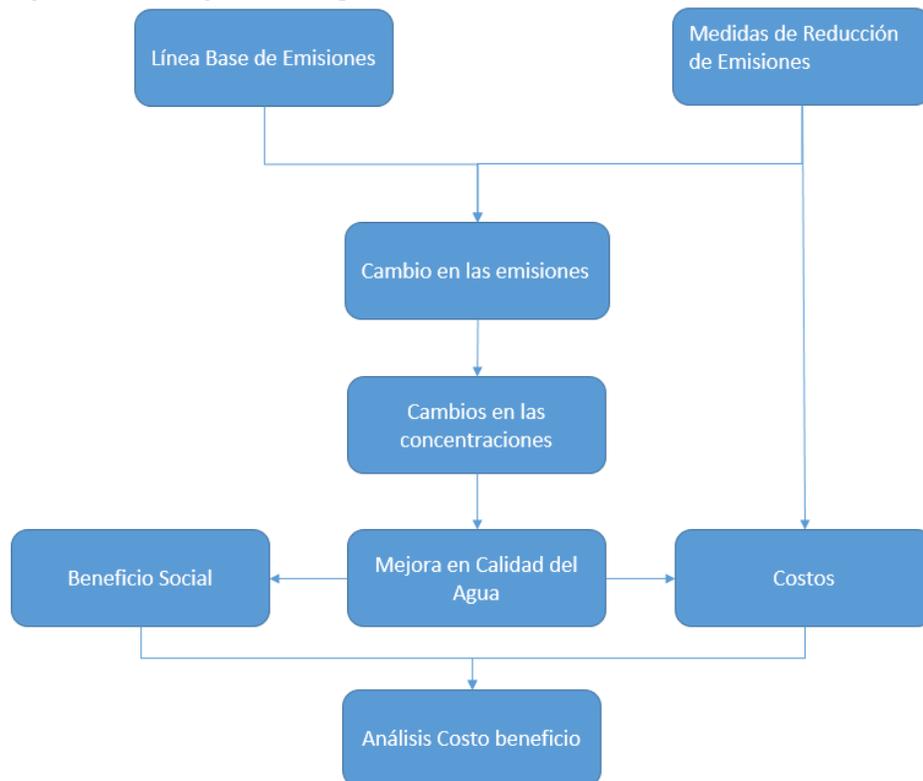
2. Metodología

2.1 Conceptualización general del Análisis General de Impacto Económico y Social.

La metodología empleada en la elaboración del AGIES está basada en un análisis de los efectos de las medidas implementadas en el PDAV sobre la línea base de emisiones estimada según el inventario de emisiones y proyectada en el período de evaluación del PDAV, el cual es de 15 años (2021 a 2035). La implementación de dichas medidas (ver, Tabla 2) generarán una reducción de las emisiones hacia el lago, las cuales a su vez modificarán en la concentración de Fósforo Total dentro del lago, específicamente en el área de vigilancia Pelagial⁶. Con esta asociación entre la emisión y la concentración se puede evaluar el cumplimiento del PDAV y de la NSCA del lago Villarrica.

El AGIES se elabora utilizando una secuencia de análisis y modelos matemáticos que permiten relacionar las interacciones descritas anteriormente, expresadas en la Figura 3. De esta metodología se pueden obtener las reducciones en emisión asociadas a las medidas a implementar y los efectos sobre la concentración en el lago, evaluando con ello el cumplimiento normativo asociado a la NSCA del lago Villarrica.

Figura 3. Diagrama metodología utilizada para la evaluación del AGIES del PDAV. Análisis costo-beneficio.



Fuente: Evaluación propia

⁶ Se evalúa Fósforo Total como “Nutriente Limitante” en la zona Pelagial, ya que esta es la de mayor representatividad del lago, para más detalles de la metodología específica revisar capítulo 2.4 y capítulo 2.5

La implementación de las medidas el PDAV involucrará costos económicos. Estos costos son considerados a través de la inversión, la operación y mantención para cada una de las medidas evaluadas. Los costos consideran la vida útil de la tecnología de abatimiento y el tiempo en que serán utilizadas dentro del plan (en años). Su elección dependerá de criterios de costo-efectividad, cuando existan variadas tecnologías que puedan aplicarse, o a criterios de factibilidad de implementación. Los costos deberán ser asumidos tanto por el Estado como por los Privados, dependiendo de las características de cada una de las medidas.

Respecto de los beneficios ambientales, la reducción de emisiones (puntuales y difusas) que genera una mejora en la calidad del agua tendrá efectos para la sociedad, estos efectos son conceptualizados a través de los servicios ecosistémicos que el lago genera. Estos servicios están relacionados al uso que la sociedad le da al lago, razón por la cual un buen flujo de servicios entre el ecosistema (lago) y la sociedad se dará cuando, las concentraciones de los parámetros declarados como saturados en el lago Villarrica, alcancen los niveles esperados por la NSCA. Por servicios ecosistémicos se debe entender a los beneficios económicos o no económicos⁷ (Díaz et al., 2018) que el ser humano percibe de los procesos y funciones de los ecosistemas (MEA, 2005). Estos están asociados a medidas de bienestar de la sociedad, que pueden ser más o menos tangibles dependiendo del servicio en cuestión (Pascual et al., 2010). Los servicios ecosistémicos, en términos generales, pueden representar el goce estético experimentado al realizar actividades recreativas en el lago o la satisfacción de preservar ecosistemas y especies para que futuras generaciones puedan acceder o disfrutar de éstos (valor de legado). En este sentido, también pueden ser clasificados de acuerdo a nivel de uso, distinguiéndose esquemáticamente valores de no-uso (e.g. valor de legado) y de uso (e.g. actividades recreacionales). Para capturar la contribución de cada uno de los servicios ecosistémicos al bienestar humano existen distintas técnicas económicas, generalmente clasificadas en las categorías de preferencias reveladas y preferencias declaradas. El empleo de unas técnicas por sobre otras, dependerá del tipo de servicios ecosistémicos con que se esté trabajando y de los objetivos de la evaluación.

En el caso del presente AGIES se utilizó una metodología de preferencias declaradas (Experimentos de Elección), debido a que una parte significativa de los servicios ecosistémicos presentes en la cuenca del lago Villarrica son de naturaleza intangible (por ejemplo, valor de existencia, valor de legado, belleza escénica, etc.). La mantención y provisión de los servicios ecosistémicos del lago Villarrica fue aproximada mediante los atributos ambientales de a) Claridad del agua (metros de visibilidad) y b) Florecimientos de algas (frecuencia de ocurrencia al año). Estos atributos permiten asociar los parámetros saturados en la cuenca, Clorofila “a” y Fósforo Disuelto, con efectos sobre el florecimiento de algas y claridad del agua, la cual está relacionada estrechamente con Transparencia (MMA, 2019).

2.2 Línea base de emisiones

La línea base de emisiones se construye con el inventario de emisiones presentado en Tabla 1, cuyo año base es el 2017. A partir de este año se proyectaron las emisiones en el tiempo, las que consideran información oficial y/o análisis que permiten estimar la evolución de las emisiones desde el año 2017 hasta el año 2035 (el período de duración del plan comprende desde el año 2021 al año 2035).

⁷ Sólo algunos servicios ecosistémicos pueden ser cuantificados y expresados en métricas monetarias.

La proyección de las emisiones está asociada a tres factores, y dependerá de la Fuente Emisora a evaluar. El primero es el aumento de la población para las comunas de Pucón y Curarrehue. El aumento de la población significará un aumento en las emisiones para las Fuentes Emisoras asociadas al inventario de emisiones (ver Tabla 1) corresponden a; Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Pucón, Alcantarillado Curarrehue, Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada, Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde lago, aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural. El segundo, se refiere a la tasa de crecimiento para Pisciculturas. Los antecedentes sobre la producción de esta piscicultura según la información entregada por la Dirección Regional de SERNAPESCA sugieren que, dada su variabilidad, no existe significancia estadística de los datos que permitan identificar un aumento o una reducción de la producción de biomasa anual para el período 2014 a 2019. Por esta razón se asume que la emisión se mantendrá constante en el tiempo. Sin embargo, se aplica un supuesto que asocia una baja en la línea base de emisión hacia el año 2035. La disminución en esta emisión se establece debido a que existe una piscicultura que, según los datos reportados por SERNAPESCA para el año 2017 (SERNAPESCA, 2020), está produciendo una cantidad mayor de toneladas de biomasa que lo reportado por su Resolución de Calificación Ambiental (RCA)⁸. Dada esta situación, se ha considerado como supuesto el ajuste a la proyección asumiendo que al inicio del plan su emisión será igual al máximo de la capacidad de producción que establece su RCA, lo cual disminuye las emisiones del sector. El objetivo de este supuesto es no atribuir las reducciones asociadas al cumplimiento de la RCA como parte de las reducciones del plan.

El tercero está asociado a las fuentes emisoras denominadas Coberturas de suelos de uso natural de la cuenca y Coberturas de suelos de uso antrópico de la cuenca, para las cuales se consideró que las emisiones se mantendrán constantes en el tiempo. Este supuesto se sustenta en el análisis de la precipitación para las estaciones pluviométricas de las comunas de Pucón y Curarrehue (MMA, 2020a), el cual muestra que no existe una tendencia estadísticamente significativa que permita concluir que las proyecciones de las precipitaciones irán al alza o a la baja, según la data de precipitación de los últimos 10 años.

En la Tabla 3 se presenta la proyección de las emisiones entre los años 2017 y 2035. Esta proyección corresponde a la línea base que utilizará el AGIES para el análisis del PDAV.

⁸ Detalles de las sanciones se pueden encontrar en <https://snifa.sma.gob.cl/Sancionatorio>

Tabla 3: Inventario de emisiones proyectado para el PDAV [ton/año].

Fuentes Emisoras	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Pisciculturas	115,50	115,50	115,50	115,50	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01	106,01
Planta de tratamiento Pucón	3,60	3,64	3,68	3,72	3,76	3,79	3,81	3,84	3,86	3,89	3,91	3,92	3,94	3,96	3,97	3,98	3,99	4,00	4,01
Alcantarillado Curarrehue	4,90	4,92	4,95	4,97	4,98	5,00	5,01	5,01	5,02	5,03	5,03	5,03	5,03	5,03	5,03	5,03	5,02	5,02	5,01
Coberturas de uso de suelo natural	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60	136,60
Coberturas de uso de suelo antrópico	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada	2,60	2,67	2,74	2,82	2,90	2,98	3,06	3,14	3,23	3,32	3,41	3,50	3,60	3,69	3,80	3,90	4,01	4,12	4,23
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde de Lago	1,20	1,23	1,27	1,30	1,34	1,37	1,41	1,45	1,49	1,53	1,57	1,62	1,66	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,95
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural	4,40	4,52	4,64	4,77	4,90	5,04	5,17	5,32	5,46	5,61	5,76	5,92	6,08	6,25	6,42	6,60	6,78	6,97	7,16
Total	302,80	303,09	303,39	303,68	294,48	294,78	295,07	295,37	295,67	295,98	296,29	296,60	296,92	297,25	297,58	297,91	298,26	298,60	298,96

Fuente: Evaluación propia

2.3 Modelación de las concentraciones

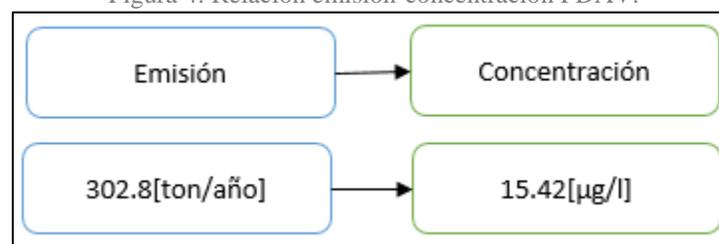
La concentración ($\mu\text{g/l}$) en la columna de agua del lago es la consecuencia directa de la carga (toneladas) que es aportada al lago. Esta carga es emitida desde las fuentes puntuales y difusas presentes en la cuenca aportante al lago. Existen otras variables que pueden influir en la concentración del lago tales como condiciones geomorfológicas, meteorológicas e hidrológicas propias de la cuenca. Sin embargo, la variable de mayor influencia es la cantidad (carga) de contaminantes que ingresan al lago de manera directa por sus afluentes.

Para poder comprender de manera sencilla cómo se comporta la concentración dentro del lago Villarrica y como será considerada dentro de este análisis, estableceremos que, independiente de variables geomorfológicas, ambientales e hidrológicas, existirá una relación lineal entre la emisión (carga) y la concentración del lago, por lo tanto, a mayor carga, la concentración aumentará.

Para el caso del PDAV se debe tener en cuenta que, el inventario de emisiones representa un valor anual de emisión, y estas emisiones deberían reflejar las concentraciones medidas en el lago. Sin embargo, debido al comportamiento de renovación de las aguas del lago (también denominado tiempo de residencia hidráulico) que puede tardar entre 2 a 4 años (UACH, 2008), se asume que la emisión del año base refleja el promedio de los promedios anuales para la data 2014-2019. Esta elección se justifica en que corresponde al período de medición desde la entrada en vigencia de la NSCA⁹. El inventario de emisiones (Tabla 1), considerando el total de fuentes emisoras, se estima en 302,8 toneladas de Fósforo Total al año. Este valor se asocia, mediante un modelo matemático, a la concentración promedio medida en las aguas del lago, la cual corresponde a 15,42 ($\mu\text{g/l}$).

La Figura 4 representa la asociación simple entre los valores ya presentados:

Figura 4: Relación emisión-concentración PDAV.



Fuente: elaboración propia

El modelo de emisión concentración se basa en estudios desarrollados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), que realizó un programa de monitoreo, medición y control de la eutrofización, en este programa se estudiaron más de 130 lagos de todo el mundo (OCDE, Vollenweider, 1982) y se estimaron relaciones entre las cargas de nutrientes y su concentración esperada en lagos, para el Fósforo total. En este estudio se propusieron diversas ecuaciones que permiten estimar estimaban la relación

⁹ Datos obtenidos a través de monitoreo de la Dirección General de Aguas y validaciones realizadas por la Superintendencia del Medio Ambiente.

entre la carga y la concentración, estas ecuaciones provienen de la propuesta realizada por Vollenweider (1982), para Fósforo total.

El modelo propuesto por Vollenweider (1982) se detalla en la Ecuación 1.

$$\text{Conc} \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right] = \frac{\text{carga} * \text{Tw}}{\text{Pm} * \text{A} * (1 + \sqrt{\text{Tw}})} * 1000 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

Conc: Concentración estimada en el lago, en [$\mu\text{g}/\text{l}$].

Carga: Emisión [P] en [Ton/año].

A: Área del lago en km^2 .

Pm: Profundidad media del lago en metros.

Tw: Tiempo de residencia hidráulico en años.

El Tiempo de residencia hidráulico es calculada a través de la Ecuación 2, propuesta en el mismo documento por Vollenweider (1982), la cual considera:

$$\text{Tw} = \frac{\text{Volumen del lago}}{\text{Caudal efluente}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Las variables¹⁰ consideradas para el cálculo de las ecuaciones son presentadas en Tabla 4

Tabla 4: valores de variables empleados.

Variable	Valor	Unidad
Área del lago	175,9	km^2
Profundidad lago	120	m
Tw	3.076	año
Volumen del lago	21.108	Millones m^3
Caudal Efluente	217,6	m^3/s

Fuente: Elaboración Propia

La estimación a través de la Ecuación 1 no genera un ajuste exacto, por lo cual se aplica un factor de corrección asociado a la relación entre el valor observado de concentración para los años 2014-2019 y el valor estimado por la Ecuación 1. Este ajuste refleja el porcentaje de error entre el valor estimado y el valor real tal como se presenta en la Ecuación 3.

¹⁰ Estas variables han sido actualizadas respecto a las utilizadas en el análisis de la NSCA, debido principalmente a nueva información disponible.

$$FC = \frac{\text{Concentración medida} - \text{Conc}}{\text{Conc}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

FC: Factor de Corrección

Concentración medida: concentración medida en el lago.

Conc: Concentración calculada a través de Ecuación 1.

Por consiguiente, y aplicando el factor de corrección a la Ecuación 1, se obtiene la Ecuación 4.

$$\text{Conc Corregida} \left[\frac{Ug}{L} \right] = \frac{\text{Conc}}{1 - Fc} \quad \text{Ecuación 4}$$

Con la Ecuación 4 se estima la concentración en el lago asociada a una carga anual, lo que permite evaluar el cumplimiento normativo y calcular, en base al inventario de emisiones, las concentraciones esperadas. Asimismo, se estima la reducción en concentración asociadas a las medidas implementadas en el plan.

2.3.1 Tiempo de respuesta del lago

Una vez calculada la relación entre la emisión y la concentración se debe incorporar un criterio que Vollenweider (1982) ha establecido como Tiempo de Respuesta (TR). El TR para el caso del lago Villarrica, se define como el tiempo en años que demora el lago en asimilar un cambio en la emisión.

Según (OCDE, 1982) en relación al TR, se debe considerar que, “con las condiciones cambiantes de carga, la concentración real del lago no está en equilibrio con la carga real. Después de que la carga se ha estabilizado durante un período prolongado, el lago alcanza un nuevo equilibrio dinámico, sin embargo, la velocidad a la que se alcanza este estado de equilibrio es algo difícil de estimar”.

Ahora bien, para estimar el Tiempo de Respuesta Vollenweider (1982) ha definido la siguiente fórmula de cálculo, la cual corresponde a la Ecuación 5.

$$TR = 3 * TW * (1 - R_{exp}) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

TR: tiempo de respuesta en años

TW: tiempo de renovación hidráulico

R_exp: Coeficiente experimental de sedimentación.

El coeficiente experimental de sedimentación “R_exp” se obtiene a través de monitoreos del lago para Fósforo Total mediante la emisión (ton/año) entrante (mediciones en afluentes del lago) y la emisión saliente (mediciones en efluentes del lago). Este coeficiente se expresa en valores que van entre 0 y 1. Valores cercanos a cero significan que existe una mayor tendencia del lago a sedimentar; por el contrario, valores cercanos a 1 indican que la sedimentación es menor. Lamentablemente para el Lago Villarrica se desconocen estos valores por falta de data. Sin embargo, cuando no existen datos, Vollenweider (1982) propone usar un valor de R_exp estimado, para esto el valor de R_exp se sustituye por R, definido en la Ecuación 6:

$$R = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1}{TW}}} \quad \text{Ecuación 6}$$

El tiempo de renovación hidráulico (Tw) ha sido estimado entre 2 y 4 en estudios realizados por la (UACH, 2008). Para efectos del PDAV, el valor de Tw se estimó en 3,067.

Teniendo estos antecedentes, se presenta una tabla que estima los tiempos de respuesta según los distintos TW y R_exp, con el fin de evidenciar la variabilidad que existe en el tiempo de respuesta del lago.

Tabla 5: relación tiempo de residencia hidráulica (TW) y coeficiente experimental de sedimentación.

R	TR (años)		
	TW=2	TW=3,067	TW=4
0,63	2	3	4

Fuente: elaboración propia.

Para efectos del cálculo del TR para el presente AGIES, y como TW ya es conocido (3.067) para Villarrica, reemplazando este valor en la Ecuación 6 se obtendrá que R = 0,63. Utilizando el valor de R, en reemplazo de R_exp en la Ecuación 5 y tal como se puede observar en la Tabla 5 este valor representa entonces que el tiempo de respuesta del lago será de 3 años.

Con este valor de TR, se estimó el desplazamiento de la concentración a causa de cambios en la emisión, esto significa que, la emisión del año x verá reflejada su concentración en el año x+3.

2.4 Nutrientes limitantes

Los nutrientes son una sustancias disueltas en el agua desde la cual los organismos (e.g. Fitoplancton) obtienen los elementos químicos necesarios para su crecimiento (Tyrrell, 2019). Dentro de los nutrientes, se puede distinguir un grupo especialmente relevante por sus consecuencias en las dinámicas comunitarias (i.e. ecología) de un ecosistema acuático y las poblaciones de sus microorganismos. Estos nutrientes clave son conocidos como nutrientes limitantes, porque controlan el crecimiento de estas poblaciones de manera casi independiente de la concentración de otros nutrientes (Correll, 1999). Esto significa que, a pesar, que un nutriente común (i.e. no limitante) tenga una concentración abundante en el medio acuático, los organismos no necesariamente podrán crecer y/o reproducirse a menos que exista un nivel mínimo del nutriente limitante. En lagos, se ha demostrado que este nutriente limitante es generalmente el Fósforo (Blomqvist et al., 2004; Correll, 1999) y por ende, controlar el nivel de Fósforo es clave para mantener niveles oligotróficos y evitar posibles florecimientos de macro o micro algas.

Debido a lo anterior, en la evaluación del PDAV se considera el parámetro de Fósforo Total como nutriente limitante (MMA, 2020a). El cumplimiento de Fósforo Total considerará que se cumplirán los límites establecidos para los contaminantes declarados como saturados.

2.5 Evaluación Zona Pelagial

Existe otro factor que influye en el análisis realizado, el cual considera que el área de vigilancia denominada como zona Pelagial, posee las características que representan de mejor manera el comportamiento fisicoquímico del lago (mezcla completa) y adicionalmente esta área de vigilancia es la que posee los límites normativos más estrictos en la NSCA respecto a las áreas de vigilancia del litoral. Por ejemplo y a modo de referencia el límite normativo para Fósforo Total en la zona centro es de 0,010 mg/l (10 µg/l), por su parte el límite para las áreas de vigilancia del litoral corresponde a 0,015 mg/l (15 µg/l). Dada esta característica del lago es que se evaluará la zona Centro.

2.6 Evaluación en áreas de vigilancia del litoral

Como se explicó anteriormente, la evaluación general del AGIES considera el parámetro Fósforo Total en el área de vigilancia del centro del lago como indicador de evaluación principal. A partir de los resultados obtenidos en este escenario, se estima el comportamiento de las concentraciones en las áreas de vigilancia litorales.

Para calcular la concentración en las áreas de vigilancia del litoral, se considera una relación (razón porcentual) entre la zona centro y cada una de las áreas del litoral. Esta relación se obtiene a partir del promedio de los datos de concentración medidos entre los años 2014 y 2019.

Tabla 6: Razón porcentual entre AV Centro y AV litoral.

Área de Vigilancia	Razón %
Centro-PEL	100%
LIT-Poza	109%
LIT-Pucón	101%
LIT-Norte	120%
LIT-Villarrica	91%
LIT-Sur	113%

Fuente: elaboración propia en base a (MMA, 2020a)

Cambios en la medición de la concentración de la zona Pelagial generarán cambios en las áreas de vigilancias del litoral. Por ejemplo, una reducción en 1 $\mu\text{g/l}$ en la zona Centro, significará una reducción de 0,917 $\mu\text{g/l}$ en el área de vigilancia de La Poza. Esto considerando que las áreas de vigilancia del litoral poseen límites menos estrictos que en la zona Pelagial.

2.7 Evaluación de contaminantes considerados como saturados.

A continuación, se presentan las metodologías para estimar el cumplimiento para los parámetros declarados como saturados. Estas permiten estimar la concentración de Clorofila “a”, Fósforo Disuelto y los metros de Transparencia a partir de la concentración de Fósforo Total.

2.7.1 Clorofila “a”

La estimación para Clorofila “a” se realiza en base la relación establecida por la OCDE, Vollenweider, (1982), representada por la Ecuación 7.

$$\text{Clorofila } a = 0,37 \cdot \left(\frac{[P]_e}{(1 + \sqrt{T_w})} \right)^{0,79} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde,

T_w: Tiempo de residencia hidráulico en años.

[P]_e: Concentración de Fósforo Total afluente al lago [mg/m^3], ver Ecuación 8.

Asumiendo que el caudal afluente es igual al efluente¹¹, podemos considerar que:

¹¹ El supuesto detrás indica que el lago se encuentra en estado estacionario, esto significa que el caudal afluente es igual al caudal efluente. El caudal afluente es representado por la cantidad de agua que entra al lago, el caudal efluente representa la cantidad de agua que sale del lago.

$$[P]_e = \frac{\text{Carga } PT_{\text{año}}}{Q_{\text{año}}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

Carga $PT_{\text{año}}$: Masa afluente de Fósforo Total en un año [mg]
 $Q_{\text{año}}$: Volumen afluente en un año [m^3]

2.7.2 Transparencia

Para Transparencia el estimador también deriva de OCDE por Vollenweider (1982), y se representa por la Ecuación 9.

$$\text{Transparencia} = 22,72 \cdot \left(\frac{[P]_e}{(1 + \sqrt{T_w})} \right)^{-0,39} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde,

T_w : Tiempo de residencia hidráulico en años.
 $[P]_e$: Concentración de Fósforo Total afluente al lago [mg/m^3], ver Ecuación 8

2.7.3 Fósforo Disuelto

Para Fósforo Disuelto, la estimación se realiza a través de datos medidos en el lago. El Fósforo Total corresponde a la suma del Fósforo en suspensión más el Fósforo Disuelto, considerando los datos de calidad medidos en el lago, entre el año 2014 y 2019, se obtiene la relación presentada en Ecuación 10.

$$\text{Fósforo Disuelto} \left(\frac{\mu g}{l} \right) = 0,59 * \text{Fósforo Total} \left(\frac{\mu g}{l} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

2.8 Costos

Los costos del PDAV corresponden a la inversión, operación y mantención asociados a la implementación de las medidas propuestas. La estimación de los costos será definida para cada una de las medidas y dependerá de información específica detallada en el anexo 6.1, donde se pueden revisar las metodologías con mayor detalle para la evaluación económica de cada medida evaluada.

Los costos de inversión corresponden a aquellos que se realizan al momento de la adquisición de equipos, infraestructura u otros insumos, por su parte los costos de

operación y mantención consideran el costo que se incurrirá mientras el proyecto opere. En la evaluación los costos de inversión se anualizan según la vida útil del proyecto. Los costos de operación y mantención son calculados según su requerimiento anual, por lo que se suman al costo de inversión anualizado. Así, se obtiene el costo total por año que deberá ser considerado para la implementación de la medida.

Una vez que se obtienen los costos anualizados para cada una de las medidas, estos se ajustan al número de periodos (en años) en los cuales la medida funcionará en el plan. En este punto se asume que, si la vida útil del equipo es superior al periodo de implementación de la medida, la diferencia no será considerada.

Finalmente, se calcula el valor presente de la inversión Ecuación 11, este valor considera una tasa de descuento del 6% (MIDESO, 2018) en los sucesivos periodos de evaluación.

$$\text{Valor presente} = \sum_{t=0}^n \frac{\text{Costos}_t}{(1+r)^t} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde,

- r:** Tasa de descuento.
- t:** Año en que se incurre en los costos.

2.9 Beneficios

Los beneficios económicos asociados a la implementación del PDAV se estimaron mediante encuestas de preferencias declaradas basadas en el método de Experimentos de Elección (MMA, 2019) (para más detalle, ver sección 3.2.2). Este estudio fue desarrollado específicamente para estimar valores de diversos atributos ambientales en el lago Villarrica. El método consiste en el levantamiento de la disposición a pago que tiene una persona, a través de encuestas presenciales, para una serie de escenarios que presentan variados atributos. La persona encuestada debe discernir entre los escenarios y escoger aquel de su preferencia. Esta elección revelará su disposición a pago para cada escenario.

El trabajo en terreno se ejecutó entre el 09 marzo y 04 de abril (2019), efectuando 680 encuestas. De estas 680, se realizaron encuestas en todas las regiones de Chile, en donde se sobre-muestreó la región de la Araucanía con 200 encuestas para obtener la mejor representación local posible y a la vez mantener el balance y representación muestral total.

De las 680 encuestas, 142 fueron calificadas como encuestas protestas¹² y fueron excluidas del análisis¹³.

El diseño muestral fue considerando un muestreo aleatorio, estratificado y aporportional. Esto quiere decir que se hicieron todos los esfuerzos logísticos y técnicos para disminuir sesgos de muestreo y las encuestas realizadas en una *muestra* (i.e. no la totalidad de la población) fueron extrapoladas al universo nacional utilizando factores de expansión representativos, con un error muestral de $\pm 3,76\%$. Solo se consideró la población adulta (población sobre los 18 años de edad) como potencial población con DAP.

En términos generales, a través del experimento de elección se estima la Disposición a Pagar (DAP)¹⁴ por mejoras en la calidad ambiental. La DAP relacionada a una mejora en la calidad ambiental, está asociada a la cantidad en dinero (generalmente), que una persona podría pagar para que se cumpla un escenario de su elección, en este caso, un escenario que mejore la calidad ambiental del lago a un costo monetario que el encuestado estime conveniente. Esta DAP por tanto refleja un valor económico que una persona está dispuesta a entregar.

Los experimentos de elección descomponen dicha calidad ambiental o el valor del servicio ecosistémico en términos de sus atributos (i.e. características, Lancaster 1966, citado en Hanley et al., 2006). En el caso del lago Villarrica, los atributos seleccionados como indicadores de la calidad del lago y de la provisión de servicios ecosistémicos asociados fueron i) la transparencia del agua y ii) la frecuencia de los florecimientos de algas. Estos atributos y sus niveles fueron testeados y validados por los consultores mediante referencias bibliográficas y cuatro talleres participativos¹⁵ (MMA, 2019).

Debido a la necesidad de capturar un valor a nivel nacional es que la elección de la metodología de experimentos de elección pueden ser la correcta, ya que logra capturar tanto valores de uso (e.g. recreación) como no-uso (e.g. valor de legado) del Valor Económico Total VET (ver más detalle en sección 6.4.1, Martín-López et al., 2012), se realizaron encuestas a nivel nacional como se indicó anteriormente.

Diferentes variables socioeconómicas (e.g. nivel de ingresos, educación y género) fueron levantadas durante el proceso de encuesta, para testear el ajuste¹⁶ de distintos modelos a los resultados de DAP y ayudar en la interpretación de los resultados. El estudio de MMA, 2019, obtuvo valores de DAP en Pesos Chilenos por persona al mes (\$CLP1.780/persona-

¹² Como respuesta protesta se entiende la manifestación del encuestado a no querer pagar nada por el bien o servicio en cuestión, pero no porque su disposición real de pago sea cero o no valore el bien, sino más bien por otras razones como no estar de acuerdo con el ejercicio de valoración o por considerar al valor de la naturaleza inconmensurable.

¹³ La exclusión del análisis solo fue considerada para el cálculo del metaanálisis, ya que, el porcentaje de respuestas protestas posteriormente fue utilizado como referencia de la población que no está dispuesta a pagar, para el cálculo final del beneficio.

¹⁴ Algunos estudios también estiman la Disposición a Aceptar Compensación por el empeoramiento en la calidad ambiental.

¹⁵ También conocidos como *focus-group*.

¹⁶ El indicador de ajuste utilizado fue log-likelihood

mes). Para agregar el beneficio de la DAP a nivel nacional, se utilizaron los datos de población adulta proyectada por el período del PDA (INE, 2018). Para reflejar el hecho de que no toda la población adulta está dispuesta a pagar por mejorar la condición del lago Villarrica, se realizó un ajuste sobre el valor total de la población adulta. Ese ajuste consistió en aplicar un 20,88% de descuento a la población adulta nacional; correspondiente a la cantidad de respuestas protestas¹⁷ proyectadas a nivel nacional.

A su vez, se debe considerar que el escenario para el cual se estimó la DAP es el que representa el cumplimiento de la NSCA. Por lo tanto, se asume que el beneficio solo se generará una vez que el PDAV logre el cumplimiento de la NSCA. Por ende, el beneficio anual agregado para la población nacional se estimó según se indica en Ecuación 12.

$$\text{Beneficio}_{total\ anual} = \text{Población}_{adulta} \cdot \text{Ajuste protesta} \cdot \text{DAP}$$

Ecuación 12.

Donde,

Beneficio _{total anual} :	Beneficio económico anual para la población, para los años con cumplimiento del Plan.
Población _{adulta} :	Población adulta nacional (número de personas) para el período de cumplimiento del plan.
Ajuste protesta:	0,7912 (1-0,2088)
DAP:	21.360 CLP /persona-año

Los resultados de estos análisis son presentados en la sección 3.2.2.

¹⁷ Como respuesta protesta se entiende la manifestación del encuestado a no querer pagar nada por el bien o servicio en cuestión, pero esto no significa que su disposición real sea cero o no valore el bien, sino que, más bien existen otras razones, tales como no estar de acuerdo con el ejercicio de valoración o considerar el valor de la naturaleza inconmensurable.

3. Resultados

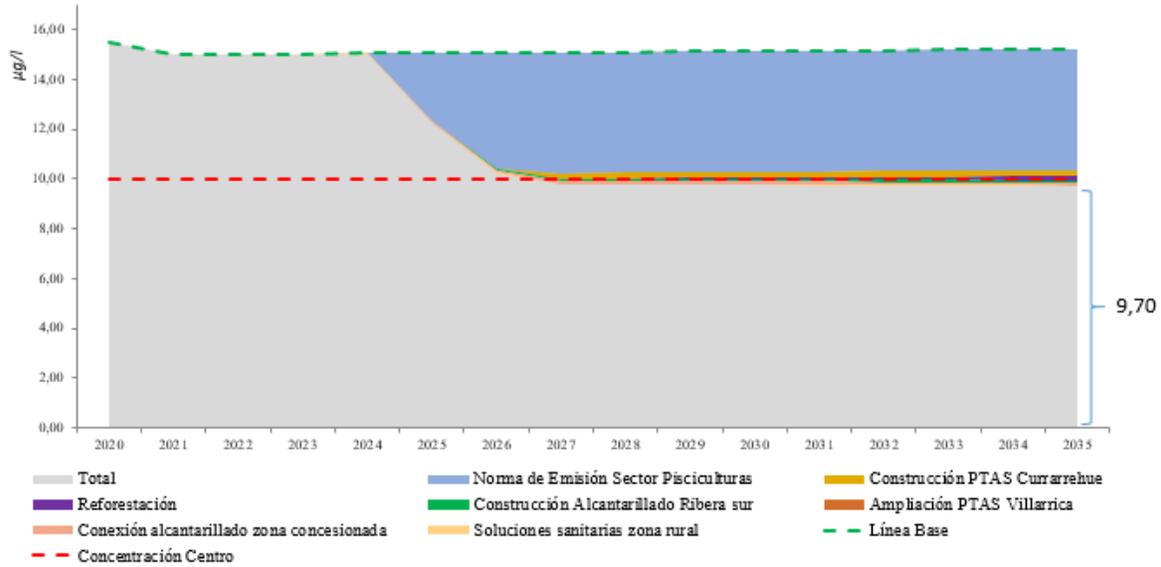
En esta sección se presentan los resultados de las medidas evaluadas según las metodologías descritas en el capítulo 2. En particular, se muestran los resultados asociados a la reducción en las emisiones y concentraciones para Fósforo total en el área de vigilancia Pelagial y el cumplimiento de los límites normativos para los parámetros declarados como saturados en la cuenca. Consecuentemente con los resultados sobre el cumplimiento se muestran los costos asociados a la implementación de las medidas descritas en la Tabla 2 y los beneficios asociados al cumplimiento de la calidad establecida en la NSCA del lago Villarrica.

3.1 Efectos en emisiones y Calidad de las Aguas del Lago Villarrica

La implementación del plan comprende un período de 15 años (2021 a 2035), considerando años calendario (1 de enero a 31 de diciembre).

La Figura 5 representa las reducciones estimadas para la concentración ($\mu\text{g/l}$) en su métrica anual, para el parámetro Fósforo total, en la zona Pelagial del lago.

Figura 5: Evolución del plan respecto a la reducción de la concentración de Fósforo total ($\mu\text{g/l}$) en el área de vigilancia Centro.



Fuente: elaboración propia.

La estimación arroja que el año 2027 se cumplirá el límite normativo establecido en la NSCA para Fósforo Total, en el área de vigilancia Pelagial del lago, los valores de concentración se mantienen por debajo del límite de calidad ($10 \mu\text{g/l}$) durante todo el período de cumplimiento (2027 a 2035), esto quiere decir que, las medidas implementadas logran reducir la concentración del lago a niveles de cumplimiento normativo.

Las reducciones en emisión permiten el cumplimiento de las metas impuestas por la NSCA desde el año 2027, razón por la cual el PDAV logra su objetivo.

Es importante destacar que, dado que en la metodología de estimación de la concentración el lago se consideró un Tiempo de Respuesta del lago (ver sección 2.3.1), existirán efectos aún después del año 2035 (fin del horizonte de evaluación del plan), debido a que el tiempo de respuesta es de 3 años. Por ende, se espera que incluso se sigan generando reducciones en concentración hasta el año 2038, a pesar de que para la evaluación del PDAV el horizonte de evaluación sea entre los años 2021 y 2035.

La Tabla 7 entrega información que permite relacionar cada uno de los sectores del inventario (Tabla 1) con las medidas implementadas para cada sector; a su vez presenta las emisiones de línea base en toneladas año para el año 2035, y la reducción de las emisiones posterior a la implementación de la medida (también para el año 2035). De esta tabla se puede inferir la relación entre el aporte de las emisiones para cada sector del inventario hacia el lago y el esfuerzo que tendrá que generar cada uno de los sectores a través de las medidas, justificando así el principio de proporcionalidad. Los dos sectores antrópicos que más aporte realizan a la emisión que recibe el lago corresponden al Sector Pisciculturas con un 35,5% de las emisiones totales, y al sector Coberturas de uso de suelo antrópico con un 11,4% de la emisión total. Para el primero se cuenta con una medida que implicará la aplicación de una Norma de Emisión, que se estima será la que logrará las mayores reducciones de todas las medidas implementadas (86,73% del total de la reducción de su emisión), mientras que, para el segundo, se aplica la medida de Reforestación, que se espera reduzca 4,35% del total de las reducciones en emisión.

Tabla 7: Emisiones por sector del inventario y medidas evaluadas, respecto de la línea base al año 2035.

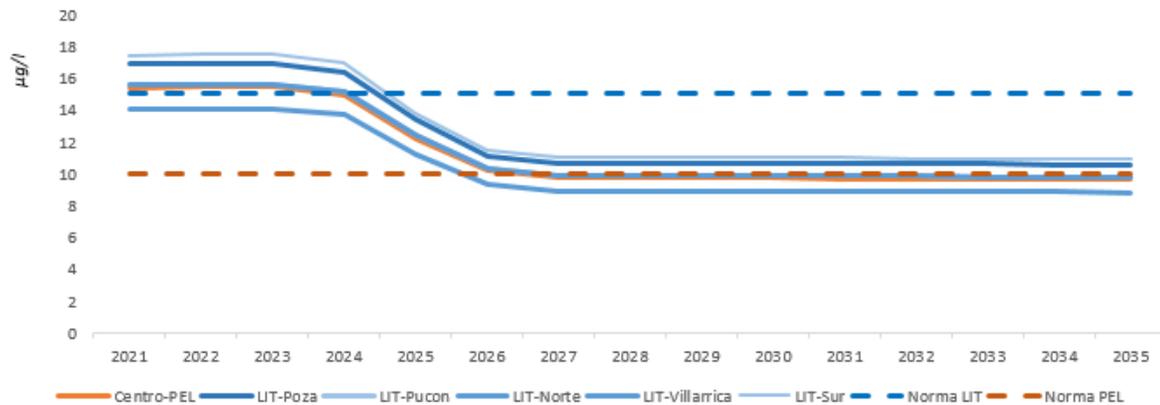
Sector del inventario	Medida Evaluada	Línea base 2035		Reducciones año 2035	
		Emisiones [ton/año]	Porcentaje emisiones línea base	Δ Emisiones [ton/año]	Δ porcentual de reducción Emisiones
Pisciculturas	Norma de Emisión sector Pisciculturas	106,01	35,5%	95,45	86,73%
Planta de tratamiento Pucón	No cuenta con medida	4,01	1,3%	0,00	0,00%
Alcantarillado Curarrehue	Construcción PTAS Curarrehue	5,01	1,7%	4,51	4,10%
Coberturas de uso de suelo antrópico	Reforestación	34,00	11,4%	4,79	4,35%
Coberturas de uso de suelo natural	No cuenta con medida	136,60	45,7%	0,00	0,00%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada	Conexión Alcantarillado Zona Concesionada	4,23	1,4%	2,14	1,95%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde de Lago	Construcción Alcantarillado Ribera Sur	1,95	0,7%	1,95	1,77%
Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural	Soluciones Sanitarias Zona Rural	7,16	2,4%	1,22	1,11%
Total		298,96	100%	110,06	100%

Fuente: elaboración propia.

3.1.1 Análisis del cumplimiento normativo para todas las áreas de vigilancia.

La Figura 6 muestra los resultados del análisis de cumplimiento para Fósforo Total en todas las áreas de vigilancia de la cuenca, según la metodología propuesta en el punto 2.6.

Figura 6: Análisis de cumplimiento para Fósforo Total en todas las áreas de vigilancia.



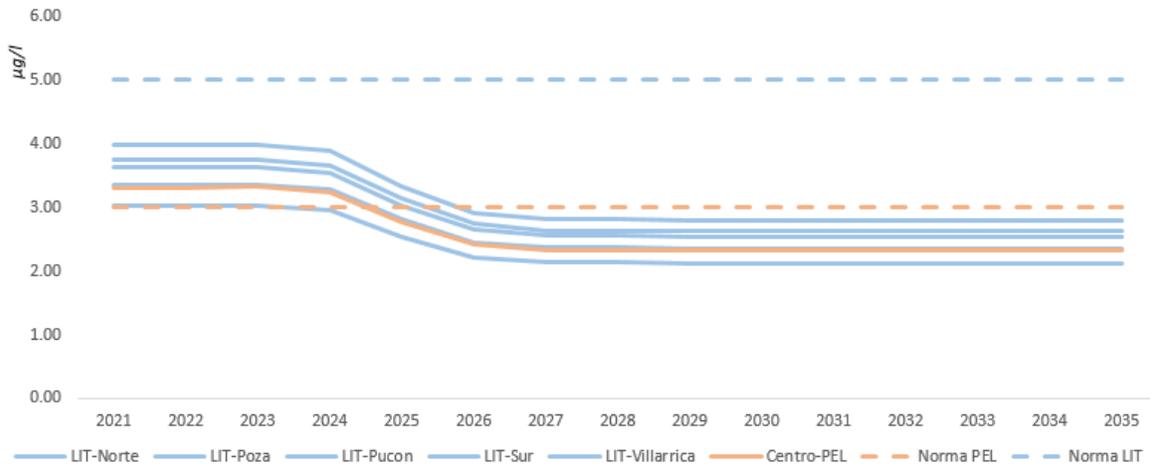
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que todas las áreas de vigilancia de la zona litoral logran el cumplimiento del límite normativo a partir de la implementación de medidas entre los años 2024 y 2025, por su parte la zona Pelagial, como ya se pudo observar en la Figura 5, logra el cumplimiento el año 2027. El cumplimiento para todas las áreas de vigilancia se mantiene durante todo el periodo de evaluación restante.

3.1.2 Análisis de cumplimiento normativo para Clorofila “a”

Para Clorofila “a” el cumplimiento se establece para todas las áreas de vigilancia de la zona litoral. Por su parte el área de vigilancia Pelagial, logra su cumplimiento a partir del año 2025, todas las áreas de vigilancia logran cumplir para Clorofila “a” incluso por debajo de los límites establecidos para la zona Pelagial. El cumplimiento se mantiene durante todo el período de evaluación.

Figura 7: Análisis de cumplimiento para Clorofila "a".

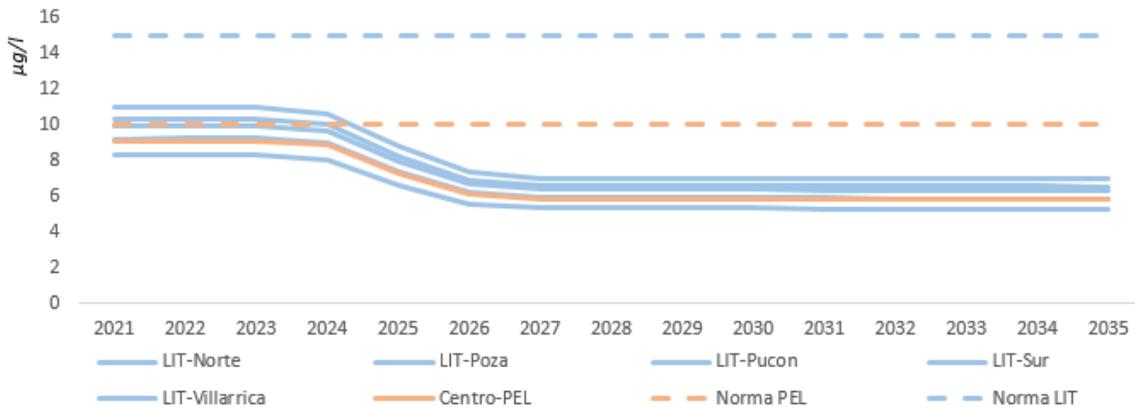


Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Análisis de cumplimiento Fósforo Disuelto.

La metodología presentada en la sección 2.7.3 se sustenta en que el Fósforo Disuelto corresponde a una fracción del Fósforo Total, razón por la cual, el cumplimiento del valor establecido mediante la NSCA del lago Villarrica se da desde el inicio del plan y se mantiene durante todo el período de evaluación. Es importante considerar que para este parámetro los límites establecidos por la NSCA poseen el mismo valor que los límites establecidos para Fósforo Total.

Figura 8: Análisis de cumplimiento para Fósforo Disuelto.



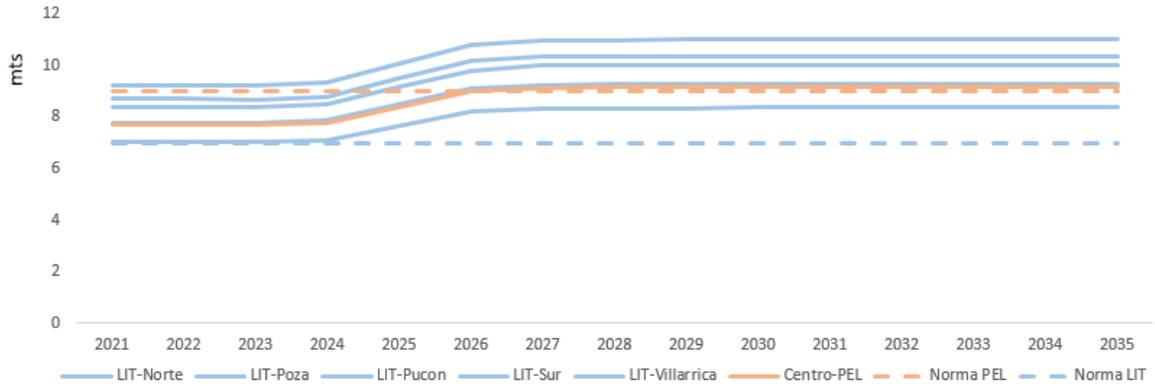
Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Análisis de cumplimiento Transparencia.

La Figura 9 presenta el análisis de cumplimiento para Transparencia. Se puede observar que, a partir de la entrada del plan, las áreas de vigilancia del litoral logran cumplir con los valores establecidos, para el área de vigilancia Centro, el cumplimiento se da en el año

2027. Los niveles de transparencia por sobre la norma se mantienen durante todo el período de evaluación del plan.

Figura 9: Análisis de cumplimiento para Transparencia.



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Indicadores Económicos

A continuación, se presentan los resultados del análisis económico de acuerdo con la metodología establecida en el capítulo 2 del presente informe.

3.2.1 Costos

En la Tabla 8 se presentan los costos asociados a cada medida evaluada en valor presente al año 2020. El costo del PDAV alcanza los US\$ 104,15 millones¹⁸.

La medida evaluada que genera los mayores costos corresponde a la implementación de una norma de emisión para el sector pisciculturas con un 46,1%, seguida por la construcción de un sistema de alcantarillado para la ribera sur del lago que representa un 31,8% de los costos. Otras medida varían su costo entre un 8,6% y un 0,6%, del costo total.

Tabla 8: Costos por medida, en valor presente en millones de dólares.

Medida Evaluada	Costos MM USD	Aporte Porcentual
Norma de Emisión sector Pisciculturas	48,01	46,1%
Construcción alcantarillado Ribera Sur	33,17	31,8%
Construcción PTAS Curarrehue	2,12	2,0%
Ampliación PTAS Villarrica	3,46	3,3%
Conexion alcantarillado Zona Concesionada	2,28	2,2%
Soluciones sanitarias domiciliarias rurales	5,54	5,3%
Reforestación	8,92	8,6%
Aumento de monitoreos	0,65	0,6%
Total	104,15	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la distribución de los costos entre los agentes que realizan la inversión, según lo presentado en la Tabla 9, el sector privado invertirá entre las distintas medidas evaluadas US\$ 86,92 millones, correspondiente a un 83,46% del total de los costos del plan. El Estado por su parte realizará una inversión de US\$ 17,23 millones, lo que representa un 16,54% del total de los costos.

¹⁸ Valor del dólar de 718.33 CLP estimado como el promedio móvil entre el 20 de Febrero de 2019 y el 20 de Febrero de 2020.

Tabla 9: Costos por medida (valor presente) según agente.

Medida Evaluada	Estado [MM USD]	Privado [MM USD]	Estado %	Privado %
Norma de Emisión sector Pisciculturas	0,00	48,01	0,00%	55%
Construcción Alcantarillado Ribera Sur	0,00	33,17	0,00%	38%
Construcción PTAS Curarrehue	2,12	0,00	12,29%	0%
Ampliación PTAS Villarrica	0,00	3,46	0,00%	3,98%
Conexión alcantarillado Zona Concesionada	0,00	2,28	0,00%	2,63%
Soluciones sanitarias domiciliarias rurales	5,54	0,00	32,17%	0,00%
Reforestación	8,92	0,00	51,77%	0,00%
Aumento de Monitoreos	0,65	0,00	3,77%	0,00%
Sub total	17,23	86,92	16,54%	83,46%
Total	104,15		100%	

Fuente: Elaboración propia.

Ataño a las medidas implementadas, la Tabla 10 muestra la Costo-Efectividad asociada a la reducción de la emisión de las medidas planteadas. Esta relaciona el costo anual de cada una de las medidas con la reducción anual de emisiones (considerando el año 2035 cuando todas las medidas estarán implementadas).

Tabla 10: Costos-efectividad de las medidas implementadas basadas en la reducción de la Emisión.

Medidas Evaluadas	Costo anualizado [MM USD/año]	Reducción plena implementación* [µg/l/año]	Costo-Efectividad [MM USD/(µg/l)]
Construcción Alcantarillado Ribera Sur	4,21	0,092	45,94
Soluciones sanitarias domiciliarias rurales	0,63	0,050	12,70
Reforestación	1,17	0,185	6,32
Conexión alcantarillado Zona Concesionada	0,26	0,109	2,39
Norma de Emisión sector Pisciculturas	5,48	4,860	1,13
Construcción PTAS Curarrehue	0,24	0,230	1,05
Ampliación PTAS Villarrica	0,46	0,000	0,00
Aumento de monitoreos	0,07	0,000	0,00
Total	8,30	5,43	1,53

*Se considera plena implementación del plan al año 2035

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 10 se concluye que la medida que genera una menor reducción a un mayor costo es la asociada a la Construcción Alcantarillado Ribera Sur, seguida por soluciones sanitarias domiciliarias rurales. Las medidas como la Conexión al alcantarillado en zonas concesionadas, la Norma de Emisión Sector Piscicultura, la construcción de una PTAS para Curarrehue poseen una alta efectividad en relación a otras medidas, ya que sus reducciones son muy altas respecto a su costo.

La medida asociada a la Ampliación PTAS de Villarrica tratará las aguas tanto de la población urbana de Villarrica como también la asociada a la medida Construcción del Alcantarillado Ribera Sur, que conducirá sus aguas hacia la PTAS de Villarrica. Sin embargo, y a modo de ordenar de presentar de mejor manera la información, las reducciones se asignan a la medida Construcción Alcantarillado ribera sur. La medida

Ampliación PTAS Villarrica no poseerá reducciones ya que, se espera que el tratamiento y la posterior emisión se realicen fuera del área del plan¹⁹.

La Tabla 11 presenta la misma información con similares resultados, pero para la Costo-Efectividad de las medidas basadas en la reducción de la concentración en el lago. Esto significa el costo por reducir un µg/l en la zona Pelagial del lago.

Tabla 11: Costo-efectividad de las medidas implementadas basadas en la reducción en concentración.

Medidas Evaluadas	Costo anualizado [MM USD/año]	Reducción plena implementación* [µg/l/año]	Costo-Efectividad [MM USD/(µg/l)]
Soluciones sanitarias domiciliarias rurales	0,63	0,005	136,04
Construcción Alcantarillado Ribera Sur	4,21	0,092	45,94
Reforestación	1,17	0,185	6,32
Conexion alcantarillado Zona Concesionada	0,26	0,109	2,39
Norma de Emisión sector Pisciculturas	5,48	4,860	1,13
Construcción PTAS Curarrehue	0,24	0,230	1,05
Ampliación PTAS Villarrica	0,46	0,000	0,00
Aumento de monitoreos	0,07	0,000	0,00
Total	12,51	5,48	2,28

*Se considera plena implementación del plan al año 2035

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Beneficios

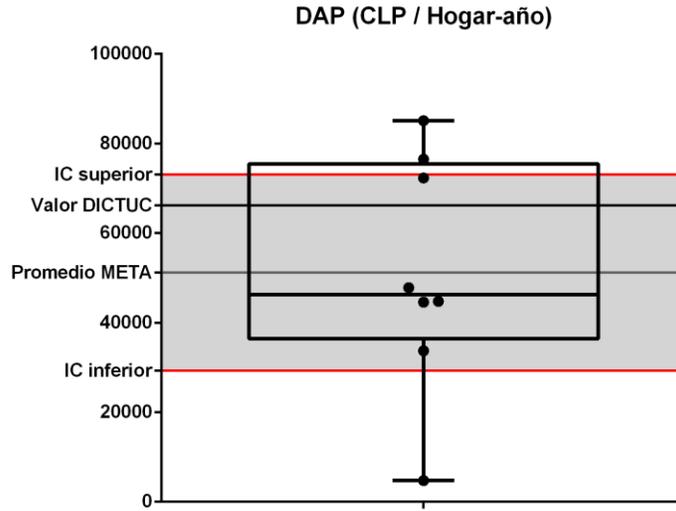
El beneficio económico asociado al PDAV asciende a US\$ 1.892 millones en valor presente al año 2020, considerando el período de evaluación establecido entre el año 2021 y el año 2035. Este valor considera los valores de uso y de no uso para la población nacional dispuesta a pagar (79%) y para los años de cumplimiento del PDAV, esto quiere decir desde el año 2027 al año 2035.

Con la finalidad de comparar los valores de DAP utilizados para el cálculo del beneficios del PDAV con otros estudios de similar índole, se presenta en la Figura 10 se muestra un gráfico de dispersión²⁰ que representa datos (puntos negros) de DAP (CLP/Hogar-año) provenientes de los metanálisis de Johnston et al., 2017, 2005 y Van Houtven et al. (2007) para cuerpos de agua lacustre. El valor mínimo de DAP reportado en estos estudios es equivalente a aproximadamente \$CLP 4.750, el valor máximo \$CLP 85.130 y el promedio \$CLP 51.200 (Figura 10, promedio META). En la Figura 10 se presenta, además, el valor de DAP estimado por MMA (2019), equivalente a 66.216 (CLP/Hogar-año) y el Intervalo de Confianza (I.C.) calculado para los datos provenientes de los meta-análisis (Figura 10, líneas rojas). De este análisis gráfico, se concluye que el valor presentado por (MMA, 2019) está contenido dentro del I.C, cuyo límite inferior equivale a \$CLP 29.310 y el superior a \$CLP 73.100. Por lo tanto, el valor de DAP utilizado en el análisis es consistente con los valores de la literatura internacional utilizados para valores de DAP por mejoras en calidad de aguas en lagos.

¹⁹ Las reducciones de emisiones asociadas a la construcción de un alcantarillado en la ribera sur del lago, están asociadas a esa medida, razón por la cual la reducción para la ampliación de la PTAS de Villarrica es cero.

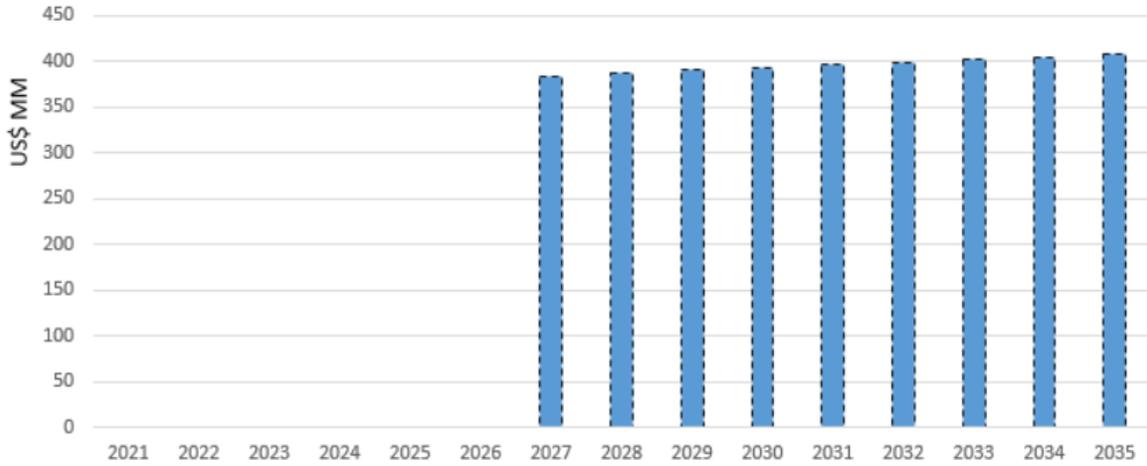
²⁰ También conocidos como boxplot

Figura 10: Boxplot e Intervalos de Confianza (I.C.) para valores de DAP (CLP/Hogar-año)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11: Beneficios agregados anuales. Proyección 2021-2035.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 11 muestra la evolución temporal de los beneficios agregados a nivel nacional. Se puede ver que estos beneficios van aumentando con el tiempo a partir del año 2027 debido al aumento de la población proyectada. Los beneficios se obtienen desde el cumplimiento del PDAV, ya que la DAP empleada asume que esta se realizará para dar cumplimiento a la NSCA. Desde el año 2021 al año 2026 no existen beneficios, puesto que el lago aún incumple con los límites establecidos para Fósforo Total en la zona Pelagial, a partir del año 2027 los beneficios se manifiestan, el año 2027 corresponde a son US\$ 383,5 millones y el año 2035 serían aproximadamente US\$ 407,12 millones²¹.

²¹ Estos no son valores presentes, son valores sin ser descontados.

Es importante destacar que estos valores de US\$ MM 383,5 y US\$ MM 407,11 por año son mayores a los estimados en el año 2011 en el AGIES de la NSCA del Lago Villarica, que alcanzaron los US\$ 17,3 millones por año²²²³. (MMA, 2011). Estas diferencias son explicables en base al tipo de metodología (o al tipo de valor que refleja la metodología empleada) de valoración que se utilizó para estimar el beneficio total. En la NSCA se utilizó precios hedónicos (Martín-López et al., 2012), mientras que en el presente AGIES se utilizan experimentos de elección. Las metodologías de precios hedónicos y experimentos de elección tienen similitudes y diferencias. Son similares en que ambas descomponen el valor de un bien o servicio en base a sus atributos (Lancaster 1966, citado en Hanley et al., 2006). Sin embargo, se diferencian en que los precios hedónicos no pueden estimar valores de no uso (e.g. legado de especies, altruismo) del Valor Económico Total (VET). Por ende, y tal como lo menciona el AGIES de la NSCA (MMA, 2011), la metodología de precios hedónicos solo proporciona una estimación de la cota inferior de los valores de uso del lago (e.g. recreación, disfrute escénico). Así, la diferencia entre los US\$D MM 17,3 y los US\$D MM 383,5 es explicada en parte por este elemento. Además, los beneficios para la NSCA se calculan considerando los beneficios que experimentarían las propiedades en torno al lago por un cumplimiento de la norma. En este sentido, los beneficios estimados en la NSCA consideran una cantidad de beneficiarios mucho más acotada que la población de usuarios y no-usuarios que el presente AGIES, elemento que también justifica que los valores aquí presentados sean mayores que el de la NSCA.

Finalmente, el PDAV posee una relación beneficio costo positiva, esto quiere decir que los beneficios económicos superan a los costos. La Tabla 12 señala que los beneficios superan 18,18 veces a los costos, esto sugiere que, la implementación del plan es altamente rentable. El beneficio total neto asociado al PDAV corresponde a 1.789 millones de dólares para la implementación del plan.

Tabla 12: Beneficios del PDAV, Relación Beneficio-Costo PDAV y beneficio Neto

Costos [MM USD]	Beneficios [MM USD]	Razón B/C	Beneficio total Neto [MM USD]
140,15	1.892	18,18	1.789

Fuente: Elaboración propia.

²² Valor actualizado al año 2020.

²³ A modo de verificación se actualizaron los beneficios obtenidos en la evaluación del AGIES de la NSCA al año 2020, los cuales fueron calculados a través de metodología de Precios Hedónicos. Estos valores corresponden a US\$ 145 millones en valor presente para el año 2020. Y superan en 1,31 veces los beneficios sobre los costos del presente plan.

4. Conclusiones

La evaluación de las medidas propuestas en el PDAV genera reducción de emisiones de los sectores aportantes. Estas reducciones implican el cumplimiento para Fósforo Total en el área de Vigilancia Pelagial, razón por la cual se asume que el PDAV logra su objetivo. Esto significa que debido a la consideración de Fósforo Total como “Nutriente Limitante” su cumplimiento significará que todos los parámetros declarados como saturados para el lago logren alcanzar niveles por debajo de la NSCA para todas las áreas de vigilancia.

Adicionalmente, el AGIES presenta los resultados de las evaluaciones que sustentan que el PDAV cumplirá con los límites de Fósforo Total para cada una de las áreas de vigilancia de la cuenca, así como el cumplimiento para todos los parámetros definidos como saturados (Clorofila “a”, Fósforo Disuelto y Transparencia).

Respecto de los beneficios, estos equivalen a US\$ 1.892 millones en valor presente, y consideran valores de uso y de no uso asociados al cumplimiento de los niveles establecidos por la NSCA. Este resultado sugiere que el Lago Villarrica es altamente valorado por la población nacional, ya que existe un alto interés por que se mantengan condiciones de calidad en sus aguas.

Los costos del plan se calcularon en US\$ 104,15 millones en valor presente, los mayores costos serán asumidos por los privados con un 83,46% del total de los costos, mientras que el estado aportará con un 16,54%. Las medidas con mayores costos corresponden a la norma de emisión para el sector pisciculturas (46.10% del total de los costos), seguida de un sistema de alcantarillado en la ribera sur del lago con un 31.85% de los costos, mientras que las demás medidas aportan en su conjunto un 22.1%.

De las medidas propuestas en el PDAV y evaluadas en el AGIES, se puede concluir que son suficientes para establecer el pleno cumplimiento de la NSCA y generarán mejoras en las condiciones ambientales del lago y también mejoras en las condiciones de vida de las personas (por ejemplo, acceso a alcantarillado, mejoras en los tratamientos de aguas servidas domiciliarias, mejoras a escala de paisaje por reforestación, etc.).

El beneficio neto del PDAV se estima en 1.789 millones de dólares, lo que sugiere que el plan es socialmente rentable y generará beneficios para toda la población del país. La relación beneficio-costos apoya a esta aseveración indicando que los beneficios superan en 18,18 veces a los costos.

Es importante señalar que los resultados obtenidos en este análisis obedecen a la metodología y supuestos establecidos y deben ser considerados como un antecedente más para la toma de decisiones, a la cual se deben incorporar otros elementos relevantes para la discusión del PDAV.

5. Referencias

- Arrow, K.J., Cropper, M.L., Eads, G.C., Hahn, R.W., Lave, L.B., Noll, R.G., Portney, P.R., Rusell, M., Schmalensee, R., Smith, V.K., Stavins, R.N., 1996. Is There a Role for Benefit-Cost Analysis in Environmental, Health, and Safety Regulation? *Science* (80-.). 272, 221–222. <https://doi.org/10.1017/s1355770x97220164>
- Blomqvist, S., Gunnars, A., Elmgren, R., 2004. Why the limiting nutrient differs between temperate coastal seas and freshwater lakes: A matter of salt. *Limnol. Oceanogr.* 49, 2236–2241. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.6.2236>
- Correll, D.L., 1999. Phosphorus: A rate limiting nutrient in surface waters. *Poult. Sci.* 78, 674–682. <https://doi.org/10.1093/ps/78.5.674>
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R.T., Molnár, Z., Hill, R., Chan, K.M.A., Baste, I.A., Brauman, K.A., Polasky, S., Church, A., Lonsdale, M., Larigauderie, A., Leadley, P.W., van Oudenhoven, A.P.E., van der Plaats, F., Schröter, M., Lavorel, S., Aumeeruddy-Thomas, Y., Bukvareva, E., Davies, K., Demissew, S., Erpul, G., Failler, P., Guerra, C.A., Hewitt, C.L., Keune, H., Lindley, S., Shirayama, Y., 2018. Assessing nature’s contributions to people. *Science* (80-.). 359, 270–272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- Donoso et al (1993) Donoso, P.; Monfil, T.; Otero, L. y Barrakes, L. 1993b. Estudio de crecimiento de plantaciones y renovales manejados de especies nativas en el área andina de las provincias de Cautín y Valdivia. *Ciencia e Investigación Forestal* 7(2): 255 – 287. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/10846>
- Hanley, N., Colombo, S., Tinch, D., Black, A., Aftab, A., 2006. Estimating the benefits of water quality improvements under the Water Framework Directive: are benefits transferable? *Eur. Rev. Agric. Econ.* 33, 391–413. <https://doi.org/10.1093/eurrag/jbl019>
- INE, 2018. Proyecciones de población [WWW Document]. S. URL <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>
- Johnston, R.J., Besedin, E.Y., Iovanna, R., Miller, C.J., Wardwell, R.F., Ranson, M.H., 2005. Systematic Variation in Willingness to Pay for Aquatic Resource Improvements and Implications for Benefit Transfer: A Meta - Analysis. *Can. J. Agric. Econ. / Rev. Can. D’ Agroéconomie* 53, 221–248. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.2005.04018.x>
- Johnston, R.J., Besedin, E.Y., Stapler, R., 2017. Enhanced Geospatial Validity for Meta-analysis and Environmental Benefit Transfer: An Application to Water Quality Improvements. *Environ. Resour. Econ.* 68, 343–375. <https://doi.org/10.1007/s10640-016-0021-7>
- Lave, L., Gruenspecht, H., 1991. Increasing the Efficiency and Effectiveness of Environmental Decisions: Benefit-Cost Analysis and Effluent Fees. *J. Air Waste*

- Manag. 41, 680–690.
- Mander, 1997, Efficiency and dimensioning of riparian buffer zones in agricultural catchments
- Martín-López, B., González, J.A., Vilarity, S., Martín-López & González, J. A., B., 2012. Ciencias de la sostenibilidad: guía docente. Univ. del Magdal.
- Maureira 1995 Maureira J. 1995. Caracterización y evaluación del crecimiento de tres plantaciones de coihue común (*Nothofagus dombeyi* (Mirb.) Oerst.) ubicadas en la Provincia de Valdivia. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile. 66 p.
- MIDESO, 2018. Precios Sociales 2018.
- MINSEGPRES, 2000. ESTABLECE NORMA DE EMISION PARA LA REGULACION DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS DESCARGAS DE RESIDUOS LIQUIDOS A AGUAS MARINAS Y CONTINENTALES SUPERFICIALES. Chile.
- MMA, 2020a. MINUTA “INVENTARIO DE EMISIONES DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA”.
- MMA, 2020b. “EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ABATIMIENTO PARA DESCONTAMINACIÓN AMBIENTAL DEL LAGO VILLARRICA”. Elaborado por COSMOVITALIS Consultores.
- MMA, 2019. ESTIMACIÓN DE BENEFICIOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN DE CALIDAD DE AGUA, PARA LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA, A TRAVÉS DE EXPERIMENTOS DE ELECCIÓN. Elaborado por DICTUC-GreenLab.
- MMA, 2018. Decreto 43: DECLARA ZONA SATURADA POR CLOROFILA “A”, TRANSPARENCIA Y FÓSFORO DISUELTO, A LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA.
- MMA, 2013. NSCA PARA LA PROTECCIÓN DE LAS AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES DEL LAGO VILLARRICA. <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1055224>, Chile.
- MMA, 2012. Aprueba Reglamento para la Dictación de Planes de Prevención y de Descontaminación. Gobierno de Chile., Chile.
- MMA, 2011. Análisis General de Impacto Económico y Social del anteproyecto de normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas del lago Villarrica. Departamento de Economía Ambiental. Ministerio del Medio Ambiente, Chile.
- Pascual, U., Muradian, R., Brander, L., Christie, M., Cornelissen, H., Eppink, F., Farley, J., Loomis, J., Pearson, L., Perrings, C., Polasky, S., Gómez-Baggethun, E., Martín-López, B., Verma, M., Armsworth, P., Christie, M., Cornelissen, H., Eppink, F., Farley, J., Loomis, J., Pearson, L., Perrings, C., Polasky, S., McNeely, J.A., Norgaard,

- R., Siddiqui, R., David Simpson, R., Kerry Turner, R., Simpson, R.D., 2010. The economics of valuing ecosystem services and biodiversity. *Econ. Ecosyst. Biodiversity. Ecol. Econ. Found.* 183–255. <https://doi.org/10.4324/9781849775489>
- SERNAPESCA, 2020. Oficio ordinario 148331.
- Tyrrell, T., 2019. Redfield Ratio, 3rd Editio. ed, *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11281-3>
- UACH, 2008. Diagnóstico de la calidad de las aguas del lago Villarrica. Universidad Austral de Chile.
- UFRO, 2020. EVALUACIÓN DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE NUTRIENTES (NITRÓGENO Y FÓSFORO) EN BASE AL ANÁLISIS DE ESCENARIOS, COMO INSUMO PARA LA PREPARACIÓN DEL ANTEPROYECTO DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO VILLARRICA. Elaborado por Universidad de la Front.
- Van Houtven, G., Powers, J., Pattanayak, S.K., 2007. Valuing water quality improvements in the United States using meta-analysis: Is the glass half-full or half-empty for national policy analysis? *Resour. Energy Econ.* 29, 206–228. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2007.01.002>
- Vollenweider, R.A., 1982. Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Wegner, G., Pascual, U., 2011. Cost-benefit analysis in the context of ecosystem services for human well-being: A multidisciplinary critique. *Glob. Environ. Chang.* 21, 492–504. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.12.008>

6. Anexos

6.1 Metodología de evaluación por sector

A continuación, se describen las metodologías específicas empleadas para la estimación de las reducciones y la estimación de los costos, presentados en el documento. A su vez se irán presentando los supuestos y la información utilizada para la modelación de cada una de las medidas. Es importante recalcar que en esta sección se describirán los costos de inversión base de las medidas, los cuales deben a su vez ser procesados a través de la metodología de evaluación de los costos dentro de un AGIES presentada en el capítulo 2.8.

6.1.1 Metodología para el sector pisciculturas

El PDAV considera una Norma de Emisión para el Sector de Pisciculturas, la cual está definida como límites de emisión por carga de Fósforo Total al año. Estos límites de emisión se diferencian para cinco rangos de capacidad de producción (ver Tabla 13). Adicionalmente, considera distintas entradas en vigencia (entre 2 y 4 años), dándole una mayor flexibilidad a las pisciculturas de menor producción o menor tamaño.

Tabla 13: Límites de emisión propuestos para pisciculturas existentes en el PDAV.

Capacidad de producción (tonbiomasa/año)	Límite de Emisión (kgPT/año)	Entra en vigencia ²⁴ para pisciculturas existentes. (a partir de publicación en el diario oficial)	Entrada en vigencia para Pisciculturas nuevas y modificaciones de proyectos existentes. (a partir de publicación en el diario oficial)
≤ 8	80	4 años	Desde el inicio del PDA
> 8 y ≤ 151	560	3 años	Desde el inicio del PDA
> 151 y ≤ 301	1.000	3 años	Desde el inicio del PDA
> 301 y ≤ 500	1.700	2 años	Desde el inicio del PDA
> 500	2.100	2 años	Desde el inicio del PDA

Fuente: Plan de Descontaminación Ambiental del lago Villarrica.

A continuación, se describe la metodología de evaluación de esta medida, especificando los pasos, supuestos e información requerida en la cuantificación de la reducción de las emisiones y la estimación de los costos.

Para cuantificar el límite de emisión que deberá cumplir cada una de las pisciculturas presentes en el área delimitada por el PDAV, se compara la capacidad de producción con la máxima producción permitida (ver Tabla 13). La máxima producción permitida está definida a través de las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), que es entregada por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), o a través de permisos especiales que SERNAPESCA otorgue a cada piscicultura.

²⁴ Para efectos de este AGIES el año de entrada en vigencia del PDAV será el año 2021.

La Tabla 14 presenta información asociada a cada una de las pisciculturas. Se puede observar en su segunda columna la producción máxima anual permitida; en su tercera columna se presenta el límite de emisión que deberá cumplir en toneladas/año (proveniente de la Tabla 13); la cuarta columna presenta la emisión base en toneladas/año al año 2017 según la información del inventario de emisiones (UFRO, 2020). Con estos antecedentes se puede determinar el cumplimiento normativo y finalmente, estimar la reducción al límite de emisión que deberá realizar cada centro.

Para estimar el cumplimiento normativo, se deben comparar el límite de emisión con la Emisión de escenario base. Si la emisión del escenario base es menor o igual al límite, entonces se entenderá que la piscicultura cumple con el límite de emisión establecido por el PDAV, y por lo tanto, no deberá realizar ninguna acción o inversión adicional. De lo contrario, si la emisión es mayor al límite establecido, la piscicultura deberá reducir su emisión al nivel establecido por el límite. La reducción requerida es la resta entre la emisión de línea base y el límite de emisión establecido. La Tabla 14 en la columna denominada “ Δ de emisiones” presenta la reducción en toneladas/año que deberá generar cada Piscicultura para dar cumplimiento a su límite normativo.

Tabla 14: Información por piscicultura.

Nombre	Producción permitida por RCA (tonbiomasa/año)	Límite de emisión a cumplir (TonPT/año)	Emisiones escenario base (TonPT/año)	Cumplimiento normativo	Δ de emisiones (TonPT/año)
PISCICULTURA OJOS DEL CABURGA	8	0,08	3,72	No cumple	3,64
PISCICULTURA CABURGA	8	0,08	0,87	No cumple	0,79
PISCICULTURA CABURGA 2	220	1	10,02	No cumple	9,02
PISCICULTURA CATRIPULLI	993	2,1	27,07	No cumple	24,97
PISCICULTURA CHEHUILCO	301	1	1,21	No cumple	0,21
PISCICULTURA CURARREHUE	400	1,7	22,68	No cumple	20,98
PISCICULTURA LA CASCADA	140	0,56	0,393	Cumple	0
PISCICULTURA LONCOTRARO	60	0,56	9,78	No cumple	9,22
PISCICULTURA LOS CHILCOS	320	1,7	1,646	Cumple	0
PISCICULTURA MOLCO	471	1,7	8,08	No cumple	6,38
PISCICULTURA QUETROLEUFU	176	1	1,7	No cumple	0,7
PISCICULTURA QUIMEYCO	120	0,56	2,48	No cumple	1,92
REPRODUCTORES CATRIPULLI	140	0,56	18,18	No cumple	17,62

Fuente: Elaboración propia en base a (SERNAPECSA, 2020), (UFRO, 2020)

Con la reducción en toneladas año que deberá realizar cada una de las pisciculturas, se evalúan sus costos utilizando los insumos provenientes de la consultoría desarrollada específicamente para este AGIES (MMA, 2020b). Este estudio diseñó 4 tipos de pisciculturas según caudales de tratamiento, especificados en la Tabla 15.

Tabla 15: Tipología de piscicultura por caudal

Piscicultura tipo	Caudal (m ³ /d)
Pequeña	13.692
Mediana	39.416
Grande	84.303
Muy Grande	147.901

Fuente: (MMA, 2020b)

Según el caudal medio reportado en AGIES (MMA, 2020b) se asigna a cada una de las piscicultura el caudal de piscicultura tipo que corresponde al presentado en la Tabla 15. El detalle de los resultados de este proceso se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16: Detalles de caudales de pisciculturas y estandarización de tamaños.

ID SERNAPESCA	Nombre de la Piscicultura	Tamaño según Tabla 15	Caudal medio mensual reportado [m ³ /d]	Caudal estandarizado según Tabla 15 [m ³ /d]
90059	PISCICULTURA OJOS DEL CABURGA	Pequeña	8.723	13.692
90060	PISCICULTURA CABURGA	Pequeña	16.101	13.692
90089	PISCICULTURA CABURGA 2	Grande	81.232	84.303
90062	PISCICULTURA CATRIPULLI	Muy Grande	173.655	147.901
90112	PISCICULTURA CHEHUILCO	Pequeña	13.567	13.692
90118	PISCICULTURA CURARREHUE	Muy Grande	159.005	147.901
90030	PISCICULTURA LA CASCADA	Pequeña	16.377	13.692
90055	PISCICULTURA LONCOTRARO	Grande	73.669	84.303
90050	PISCICULTURA LOS CHILCOS	Mediana	32.814	39.416
90085	PISCICULTURA MOLCO	Mediana	37.895	39.416
90069	PISCICULTURA QUETROLEUFU	Mediana	47.541	39.416
90082	PISCICULTURA QUIMEYCO	Muy Grande	111.043	147.901
90137	REPRODUCTORES CATRIPULLI	Grande	98.009	84.303

Fuente: Elaboración propia, en base a (MMA, 2020b)

La razón de estandarizar cada piscicultura, a una piscicultura tipo, tiene relación a la factibilidad de analizar distintos escenarios de reducción, para esto, MMA, 2020b evaluó cinco escenarios (de reducción y costos), según opciones de tecnologías de abatimiento para cumplir los límites de emisión propuestos. La aplicación de estas técnicas tiene relación con lo señalado en estudio MMA (2020b), donde se especifica que, dada la escala de caudales actualmente utilizados por las pisciculturas, el dimensionamiento y las tecnologías a aplicar dificultan el análisis de sistemas de abatimiento convencionales, tales como tratamientos de final de línea (rotrofiltros, filtros y tratamientos químicos) (ver capítulo 3.3.3.1 de MMA, (2020b)). Debido a esto, los escenarios se definieron acorde a técnicas de reducción de caudal que implican cambios en el sistema productivo, según lo presentado en la Tabla 17, en donde también se presentan las eficiencias a las que pueden llegar estos sistemas para los escenarios planteados.

Tabla 17: Escenarios propuestos para la evaluación de los costos.

Escenario	Sistemas de abatimiento implementados
Escenario Base:	Línea Base (mantener los abatimientos presentes en las pisciculturas [sedimentadores y rotofiltros]).
Escenario 1:	Recirculation Aquaculture System (RAS), tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación, Sedimentador y Reactor Biológico
Escenario 2:	Recirculation Aquaculture System (RAS) y humedal construido, tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación, Sedimentador y Reactor Biológico
Escenario 3:	Recirculation Aquaculture System (RAS) y lombrifiltro, tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación y Sedimentador.
Escenario 4:	Reuso, tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación, Sedimentador y Reactor Biológico

Fuente: (MMA, 2020b)

A continuación se describen las tecnologías presentadas en la Tabla 17 de forma de comprender su funcionamiento y utilidad, para más detalles de cada una de las tecnologías revisar MMA (2020b)²⁵, capítulo 3.2.

- **RAS (Recirculation Acuaaquulture System):** es una tecnología que permite la recirculación de las aguas utilizadas en la crianza de peces. Un RAS considera la recirculación de un 95%, lo que se traduce en que solo se incorporará al sistema un 5% de caudal. Este sistema de tratamiento no abate directamente algún parámetro, ya que solo recircula el agua, sin embargo, se asume como supuesto que su eficiencia se traduce en el % de recirculación de agua que generará, es decir su eficiencia en remoción se encontrará entre un 95% a un 99% para Fósforo Total.
- **Coagulación-Floculación:** Es una técnica química de tratamiento que consiste en la aglomeración de partículas suspendidas en el agua, esta aglomeración de partículas disueltas genera flóculos de mayor tamaño, los cuales sedimentan por peso. Una vez sedimentadas las partículas son separadas por sistemas de tratamiento convencionales, tales como sedimentadores. Esta técnica es utilizada para la reducción de Fósforo Total.
- **Reactor Biológico:** Sistema de tratamiento basado en el uso de una biopelícula plástica que permite un crecimiento biológico específico de poblaciones de bacterias las cuales consumen partículas, reduciendo para los parámetros de interés, Fósforo soluble e insoluble.
- **Humedales Construidos:** Esta técnica de depuración de contaminantes considera el uso de un humedal. Este humedal reduce o elimina contaminantes por medio de procesos biológicos de bioacumulación propios de las plantas del humedal, efectuándose en humedales artificiales creados a través de estanques o canales en los que se plantan especies vegetales adaptadas a la vida acuática. Esta técnica es utilizada para la remoción de Fósforo Total.
- **Biofiltro con lombrifiltro:** consiste en un filtro en el cual lombrices de tierra que metabolizan los sólidos presentes en el agua residual, mientras que las bacterias

²⁵ Esta consultoría solo cuantifico las reducciones de parámetros asociados a fósforo y nitrógeno.

eliminan contaminantes Disueltos, al mismo tiempo que el sustrato genera un filtro para el RIL emitido, permitiendo la remoción de Fósforo Total.

- **Reuso:** Similar al sistema RAS, el reuso es menos eficiente en la remoción y en el caudal a tratar ya que no considera la etapa de filtración biológica. Este cambio se realiza debido a que el sistema de reuso, solo recircula una cantidad limitada de agua, la cual se estima entre el 50% y el 75% del caudal.

El primer escenario considera la línea base (no hacer nada y mantener las tecnologías hoy en día implementadas por las Pisciculturas), por lo cual este solo sirve como escenario de control. Los escenarios 1, 2 y 3 presentan la implementación de un sistema RAS con un 95% de recirculación y distintos escenarios para el control de Fósforo Total y Nitrógeno (la implementación de control de Nitrógeno se debe a que es necesario para mantener condiciones necesarias para evitar la mortalidad de peces). Finalmente, el escenario 4 evalúa el reuso de las aguas tratadas más tratamientos adicionales para la disminución de Fósforo y Nitrógeno.

La eficiencia en el abatimiento de estos escenarios se puede observar en la Tabla 18.

Tabla 18: Eficiencias en abatimiento e Fósforo Total por escenario y tamaño de piscicultura

Escenario	Pequeña	Mediana	Grande	Muy grande
1	98,46%	94,40%	96,93%	90,90%
2	98,75%	95,40%	97,50%	92,58%
3	98,33%	93,90%	96,66%	90,10%
4	96,45%	87,00%	92,90%	78,90%

Fuente: Elaboración propia en base a (MMA, 2020b)

Por su parte la eficiencia requerida por cada piscicultura, considerando la reducción de emisiones, es presentada en la Tabla 19. Se puede observar que cada piscicultura logra cumplir sus porcentajes de abatimiento requeridos.

Tabla 19: Eficiencia requerida por RCA para cumplimiento de límite de emisión

Pisciculturas	Porcentaje de abatimiento requerido	Tamaño según Tabla 15
PISCICULTURA OJOS DEL CABURGA	97,85%	Pequeña
PISCICULTURA CABURGA	90,80%	Pequeña
PISCICULTURA CABURGA 2	90,02%	Grande
PISCICULTURA CATRIPULLI	92,24%	Muy Grande
PISCICULTURA CHEHUILCO	17,36%	Pequeña
PISCICULTURA CURARREHUE	92,50%	Muy Grande
PISCICULTURA LA CASCADA	0%	Pequeña
PISCICULTURA LONCOTRARO	94,27%	Grande
PISCICULTURA LOS CHILCOS	0%	Mediana
PISCICULTURA MOLCO	78,96%	Mediana
PISCICULTURA QUETROLEUFU	41,18%	Mediana
PISCICULTURA QUIMEYCO	77,42%	Muy Grande
REPRODUCTORES CATRIPULLI	96,92%	Grande

Fuente: Elaboración propia

El estudio MMA, (2020b) realizó un levantamiento de información sobre costos. Estos costos consideraron valores de tecnologías a nivel nacional, los cuales se obtuvieron a través de cotizaciones, cuando no fue posible obtener valores para alguna tecnología en particular se utilizaron costos obtenidos de revisiones bibliográficas. Con esta recopilación de información se estimaron los costos de inversión y de operación más mantención para cada escenario y por cada tamaño de piscicultura.

Tabla 20: Costos por Fósforo Total reducido, para cada tamaño de piscicultura y para cada escenario propuesto, en USD dólares.

Escenarios	Tipo de costo	Costo (USD/ton _{PT} y USD/ton _{PT} /Año)			
		Muy Grande	Grande	Mediana	Pequeña
1	Inversión	153.258	126.947	174.961	270.099
	Operación y mantención	35.917	33.411	49.838	105.383
2	Inversión	266.966	217.184	279.175	380.521
	Operación y mantención	34.107	32.019	47.193	98.005
3	Inversión	502.722	392.536	484.847	584.745
	Operación y mantención	41.067	37.448	55.406	113.597
4	Inversión	266.632	156.516	290.312	607.144
	Operación y mantención	77.541	49.699	92.854	227.890

Fuente: Elaboración propia en base a (MMA, 2020b)

Los costos de la Tabla 20 se dividen en costos de inversión, considerados en US\$ dólares por cada tonelada de Fósforo Total reducida y de operación en US\$ dólares al año por cada tonelada de Fósforo Total reducida, respectivamente. Estos costos son multiplicados por el Δ de emisión en toneladas que debe reducir cada una de las pisciculturas (Tabla 14). Con esto se obtiene la estimación del costo que podría incurrir cada piscicultura para cada uno

de los escenarios propuestos (descritos en Tabla 17). Considerando que para cada uno de los escenarios la vida útil ha sido estimada en 20 años (MMA, 2020b) para más detalles de estos costos en el anexo 6.3 del presente documento.

De los costos presentados en la Tabla 21, se puede evaluar para cada una de las pisciculturas la tecnología que incurrirá en un menor costo, según su Δ de emisión (reducción), según la capacidad de abatimiento requerida (ver Tabla 19) y la eficiencia del escenario modelado (ver Tabla 18).

La Tabla 21 presenta los costos para cada uno de los escenarios de abatimientos a los que una piscicultura puede optar. Los escenarios a los que pueden optar están dados por la eficiencia que requiere cada piscicultura y la eficiencia a la que puede funcionar cada uno de los escenarios que se evaluaron (ver Tabla 18). A continuación, se presentan los costos de inversión, para cada uno de los escenarios y para cada piscicultura según su tamaño según caudal de diseño.

Tabla 21: costos de inversión por reducción total de Fósforo total asociada al límite de emisión por piscicultura para cada escenario aplicable.

Nombre de la Piscicultura	Tamaño según caudal	Costo (US\$)			
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
PISCICULTURA OJOS DEL CABURGA	Pequeña	983.159	1.385.098	2.128.320	
PISCICULTURA CABURGA	Pequeña	213.378	300.612	461.916	479.644
PISCICULTURA CABURGA 2	Grande	1.145.064	1.959.002	3.540.670	1.411.773
PISCICULTURA CATRIPULLI	Muy Grande		6.665.618		
PISCICULTURA CHEHUILCO	Pequeña	56.721	79.910	122.788	127.500
PISCICULTURA CURARREHUE	Muy Grande		5.600.956		
PISCICULTURA LONCOTRARO	Grande	1.170.453	2.002.439	3.619.177	
PISCICULTURA MOLCO	Mediana	1.116.254	1.781.138	3.093.323	1.852.192
PISCICULTURA QUETROLEUFU	Mediana	122.473	195.423	339.393	203.219
PISCICULTURA QUIMEYCO	Muy Grande	296.421	512.576	965.225	511.934
REPRODUCTORES CATRIPULLI	Grande	2.236.810	3.826.787		

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, con estos costos se escogió el mínimo costo para cada piscicultura entre los escenarios propuestos. Con esto se obtuvo la estimación del costo de inversión asociado a la reducción de cada piscicultura por su costo medio de reducción para el contaminante Fósforo Total, el cual se puede observar en la Tabla 22.

Tabla 22: Costos asociados a la reducción de emisión de pisciculturas, considerando escenario de mínimo costo, en USD dólares.

Piscicultura	Costos de inversión (US\$)	Escenario escogido
PISCICULTURA OJOS DEL CABURGA	983.159	Escenario 1
PISCICULTURA CABURGA	213.378	Escenario 1
PISCICULTURA CABURGA 2	1.145.064	Escenario 1

PISCICULTURA CATRIPULLI	6.665.618	Escenario 2
PISCICULTURA CHEHUILCO	56.721	Escenario 1
PISCICULTURA CURARREHUE	5.600.956	Escenario 2
PISCICULTURA LA CASCADA	0	
PISCICULTURA LONCOTRARO	1.170.453	Escenario 1
PISCICULTURA LOS CHILCOS	0	Escenario 1
PISCICULTURA MOLCO	1.116.254	Escenario 1
PISCICULTURA QUETROLEUFU	122.473	Escenario 1
PISCICULTURA QUIMEYCO	296.421	Escenario 1
REPRODUCTORES CATRIPULLI	2.236.810	Escenario 1
Total	19.607.307	

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente el costo asociado a la reducción de emisión de cada piscicultura se debe anualizar según su vida útil (20 años para todos los escenarios propuestos por (MMA, 2020b)), para luego calcular el valor presente de la inversión, tal como se describe en la metodología general capítulo 2.8.

Respecto a los costos de operación y mantención, en la siguiente tabla se presentan los costos asociados a cada uno de los escenarios que le corresponde implementar a las pisciculturas dado el mínimo costo.

Tabla 23: Costos de operación y mantención, asociados al escenario de menor costo de inversión escogido para la evaluación.

Nombre de la Piscicultura	Tamaño según Caudal	Costo (USD/año)
PISCICULTURA OJOS DEL CABURGA	Pequeña	386.441
PISCICULTURA CABURGA	Pequeña	82.410
PISCICULTURA CABURGA 2	Grande	303.615
PISCICULTURA CATRIPULLI	Muy Grande	854.245
PISCICULTURA CHEHUILCO	Pequeña	90.271
PISCICULTURA CURARREHUE	Muy Grande	715.999
PISCICULTURA LA CASCADA	Pequeña	0
PISCICULTURA LONCOTRARO	Grande	316.536
PISCICULTURA LOS CHILCOS	Mediana	0
PISCICULTURA MOLCO	Mediana	333.092
PISCICULTURA QUETROLEUFU	Mediana	34.918
PISCICULTURA QUIMEYCO	Muy Grande	63.213
REPRODUCTORES CATRIPULLI	Grande	585.045
TOTAL		3.691.616

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Metodologías para el sector Alcantarillado de Curarrehue

El PDAV impulsará la implementación de una PTAS para tratar las aguas residuales del área urbana de la comuna de Curarrehue, las cuales hoy en día son vertidas al río Trancura. La planta deberá ser diseñada para dar cumplimiento a una norma de emisión de 2mg/L de Fósforo Total.

La medida será estimada a través de la implementación de un sistema de tratamiento denominado Biorreactor Discontinuo Secuencial (SBR por sus siglas en inglés)²⁶, la elección de esta metodología ha sido considerada debido a que alcanza altas remociones de Fósforo Total (eficiencia promedio de 90%), que su aplicabilidad es factible en plantas de tratamiento de aguas servidas y que su tecnología es posible de implementar en el país.

El dimensionamiento del SBR está dado por el caudal en m³/día a tratar, así como su costo de inversión y su costo de operación y mantención. Para el dimensionamiento del caudal, se consideró la población urbana de la comuna de Curarrehue, para el año 2030, según las proyecciones del CENSO, este año representarán la mayor población urbana²⁷ de la comuna, dentro del período de evaluación del PDAV.

El caudal dimensionado para el año 2030 corresponde a 340 m³/día (14,17 m³/hr). Con este caudal se estima el costo de inversión y de operación y mantención para el sistema SBR según el caudal a tratar Ecuación 13. y Ecuación 13.), según AMPHOS 21 (2014).

$$\text{Costos de Inversión [USD]} = 302.390 \cdot \text{Caudal}^{-0.45} \quad \text{Ecuación 13.}$$

$$\text{Costos de Operación y mantención} \left[\frac{\text{USD}}{\text{año}} \right] = 24.479 \cdot \text{Caudal}^{-0.514} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde,

Caudal: caudal de diseño de la planta expresado en m³/h

6.1.3 Metodología para el sector de coberturas de suelo antrópico

Se controlará la contaminación difusa para las emisiones del inventario asociadas a “Coberturas de uso antrópico de la cuenca”, utilizando como medida de manejo la reforestación de suelos que posean escasa cobertura vegetal. Este tipo de vegetación, que está asociada a los bordes de riberas de ríos y lagos es denominado como “vegetación ripariana” y naturalmente realiza funciones ecológicas como la retención de contaminantes y disminución de la erosión. Por ende, esta medida reducirá la emisión de Fósforo Total, debido a que pretende realizar un cambio en la cobertura desde suelos desnudos a suelos

²⁶ Los costos de esta tecnología consideran el diseño de ingeniería de la planta e implementación de la planta, más los costos de operación y mantención anuales. pero no consideran la compra de terrenos u otros costos adicionales.

²⁷ Corresponde a 2134 personas para el área urbana.

con cobertura vegetal, y este cambio generará que disminuyan los procesos de erosión y escorrentía por las mencionadas funciones ecológicas.

Según Mander et al (1997) La reforestación de franjas ribereñas aumenta la retención del fósforo transportado por flujo superficial y/o subsuperficial hacia la red hídrica. Para la modelación de la medida de restauración de riberas se han considerado fenómenos específicos, tales como: sedimentación, asimilación de plantas, adsorción del suelo, asimilación de bacterias, entre otros. Debido a la vegetación específica con la cual se ha propuesto realizar la restauración ribereña de la cuenca, se decidió utilizar un coeficiente de retención de bosques caducos.

En la Tabla 24 se presentan las hectáreas totales a reforestar y la reducción de emisión en $\text{kg}_{\text{PT}}/\text{ha}/\text{año}$ utilizada para la evaluación, obtenida de Mander et al (1997).

Tabla 24: Hectáreas potenciales a reforestar en el área de la cuenca y su reducción en toneladas/año.

Medida	Hectáreas potenciales a reforestar	Reducción Emisión [$\text{kg}_{\text{PT}}/\text{ha}/\text{año}$] ²⁸
Restauración de Riberas (franjas Riparianas)	2.000	2,9

Fuente: Elaboración propia

Para dar cumplimiento al PDAV se considera que, la reforestación de 2,000 hectáreas se realizará en un período de 10 años. Esto equivale a reforestar aproximadamente 200 hectáreas anuales durante los 10 primeros años del PDAV, se utiliza esta forma de modelación para permitir modelar de una manera más cercana a la realidad la implementación de la medida, basados en la experiencia de implementación y evaluación en Planes de Descontaminación de Aire, para el programa de recambio de calefactores.

Por otra parte, la reforestación no generará reducciones inmediatas, ya que los bosques en estados juveniles, a pesar de tener una alta capacidad de absorción de nutrientes como fósforo debido a su crecimiento Mander et al (1997), no logran generar inmediatamente una reducción óptima. Por esta razón, se ha considerado una tasa lineal de reducción, la cual se ha construido relacionando la reducción con las tasas de crecimientos volumétricos para Raulí (*Nothofagus alpina*) y Coihue (*Nothofagus dombeyi*) según estudios realizados por Donoso et al (1993) y Maureira (1995). Antecedentes de estos estudios señalan que el máximo crecimiento volumétrico de estas especies se produce a los 12 años, razón por la cual el supuesto se basa en que la reducción aumentará linealmente año a año en un período de 12 años. La Tabla 25 representa este supuesto del porcentaje reducción de Fósforo Total en el tiempo.

Tabla 25: Restricción asociada a la reducción de emisiones para Reforestación en Años.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8%	17%	25%	33%	42%	50%	58%	67%	75%	83%	92%	100%

Fuente: Elaboración propia.

²⁸ Mander, 1997, Efficiency and dimensioning of riparian buffer zones in agricultural catchments

Los costos de reforestación por hectárea propuestos por CONAF²⁹, se asocian a 700 hectáreas para forestación (70 hectáreas anuales), 500 hectáreas para reforestación (50 hectáreas anuales) y 800 hectáreas para restauración (80 hectáreas al año). Para el cálculo total del costo de la medida, se multiplica el costo de una hectárea por el número de hectáreas a reforestar dentro del período de 10 años.

Respecto de los costos, se utilizaron los costos específicos desarrollados por CONAF para un Plan de Forestación, Reforestación y Restauración en el marco del PDAV. Estos costos consideran los costos de establecimiento y manejo para especies nativas asociadas a bosques del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue. Estos costos corresponden a los indicados en la Tabla 26 para forestación, Tabla 27 para reforestación y Tabla 28 para restauración.

²⁹ Información entregada por CONAF para la evaluación de la NDC.

Tabla 26: Costos de Forestación por hectárea.

Actividades	Cantidad	Costo unitario en CLP	Costos por hectárea
Plántulas	1.000	1.200	1.200.000
Subsolado o casilla mecánica	1	160.000	160.000
Protector individual contra lagomorfos	1.600	450	720.000
Tutores	3.200	71	227.200
Control de competencia pre-plantación	1	80.000	80.000
Mano de obra de establecimiento (jornada)	3	30.000	90.000
Fertilizante (kg)	23	443	10.189
Aplicación de fertilizante (jornada)	2	30.000	60.000
Cerco perimetral de Exclusión de ganado (km)	-	1.600.000	1.600.000
Total Plantación (IVA)			4.147.389
Costo por hectárea (USD)			5.774

Fuente: Elaboración propia en base a Información entregada por CONAF para PDAV

Tabla 27: Costos Reforestación por hectárea

Actividades	Cantidad	Costo unitario en CLP	Costos por hectárea
Plántulas	1.000	1.200	1.200.000
Subsolado o casilla mecánica	1	160.000	160.000
Protector individual contra lagomorfos	1.600	450	720.000
Tutores	3.200	71	227.200
Control de competencia pre-plantación	1	80.000	80.000
Mano de obra de establecimiento (jornada)	3	30.000	90.000
Fertilizante (kg)	23	443	10.189
Aplicación de fertilizante (jornada)	2	30.000	60.000
Cerco perimetral de Exclusión de ganado (km)	-	1.600.000	1.600.000
Total Plantación (IVA)			4.147.389
Total+ Factor de Corrección	0.8		3.317.911
Costo por hectárea (USD)			4.619

Fuente: Elaboración propia en base a Información entregada por CONAF para PDAV

Tabla 28: Costos de Restauración por hectárea

Actividades	Cantidad	Costo unitario en CLP	Costos por hectárea
Obras de conservación de suelos			313.022
Plántulas	600	1.200	720.000
Subsolado o casilla mecánica	1	160.000	160.000
Protector individual contra lagomorfos	1.600	450	720.000
Tutores	3.200	71	227.200
Control de competencia pre-plantación	1	80.000	80.000
Mano de obra de establecimiento (jornada)	3	30.000	90.000
Fertilizante (kg)	23	443	10.189
Aplicación de fertilizante (jornada)	2	30000	90.000
Cerco perimetral de Exclusión de ganado (km)	1	1.600.000	1.600.000
Total Plantación (IVA)			3.980.411
Total+ Factor de Corrección	1.2		4.776.493
Costo por hectárea (USD)			6.649

Fuente: Elaboración propia en base a Información entregada por CONAF para PDAV

Adicionalmente se incorporaron los costos asociados a la contratación de 4 extensionistas forestales, quienes cumplirán labores de asistencia técnica para el desarrollo de las actividades. El programa de extensión se realizará durante los 3 primeros años y considerará un monto de 22.000.000 anuales por profesional.

6.1.4 Metodología para el sector de Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en borde de lago.

Se implementará una red de alcantarillado y agua potable para la ribera sur del lago que comprende el área de 200 metros entre el borde del lago y la cota superior, desde la ciudad de Pucón hasta la Ciudad de Villarrica, cuya distancia considerada para la evaluación es de 23 kilómetros (distancia entre la red de alcantarillado de Pucón y la red de alcantarillado de Villarrica).

La implementación de esta medida permitirá canalizar las aguas residuales y de agua potable de viviendas en la zona, las cuales han sido estimadas en 1.119. La canalización se realizará a través de dos tubos, y requerirá la implementación de 10 Plantas Elevadoras de Aguas Servidas (PEAS)³⁰. Las PEAS permiten impulsar el agua desde una cota inferior (borde de lago) a una cota superior. Una vez construida la red sanitaria, cada vivienda deberá conectarse a esta red para evacuar sus aguas residuales.

Las aguas generadas en la ribera sur serán tratadas en la PTAS de la ciudad de Villarrica. Bajo este escenario, toda la emisión generada en esta parte de la cuenca será eliminada

³⁰ El supuesto del Número de PEAS Corresponde al valor utilizado en el AGIES de la NSCA.

fuera de la cuenca, razón por la cual se ha considerado como supuesto que, para el PDAV la eficiencia de la medida logra un 100% de reducción.

Los costos considerados para la estimación de esta medida corresponden a costos promedio obtenidos de diversos programas elaborados por la SISS a través del país para la implementación de sistemas similares.

La Tabla 29 presenta los costos en dólares para cada uno de los ítems de inversión, y fueron obtenidos a través de datos entregados directamente por al SISS³¹.

Tabla 29: costos de inversión, para la construcción de la red entre la ciudad de Pucón y Villarrica.

Ítems de inversión	Costo de inversión (USD)	Unidad
Construcción de la red	593.39	USD/Metro
Conexión Vivienda	1,186.78	USD/Vivienda
Valor PEAS	197,797.18	USD/Planta

Fuente: Elaboración propia. En base a información SISS

Estos costos al ser multiplicados por la cantidad de kilómetros de la red, el número de viviendas que deben conectarse y el número de PEAS estimadas para el funcionamiento del sistema, construyen el costo de inversión asociado a la medida. Los costos de operación y mantención anuales corresponden al 5% de la inversión total.

6.1.5 Metodología para la evaluación de costos de la PTAS de Villarrica.

El PDAV posee dos medidas que significarán una ampliación de la PTAS de la comuna de Villarrica, la primera medida se refiere a la canalización de las aguas residuales de la ribera sur del lago, y la segunda se refiere a la obligación de a una norma de emisión de 2 mg/L de Fósforo Total para todas las aguas residuales provenientes del área delimitada para el PDAV.

Dada esta situación se estimaron los costos asociados a la implementación de un sistema denominado Biorreactor Discontinuo Secuencial (SBR por sus siglas en inglés), la elección de esta metodología ha sido considerada debido a que alcanza altas remociones de Fósforo Total (eficiencia promedio de 90%), que su aplicabilidad es factible en plantas de tratamiento de aguas servidas y que su tecnología es posible de implementar en el país.

El dimensionamiento del SBR está dado por el caudal en m³/día a tratar, así como su costo de inversión y su costo de operación y mantención.

Para el dimensionamiento del caudal, se consideró en primer lugar la población asociada a la ribera sur, más la población urbana de la ciudad de Villarrica. Se considera la población del año 2035 para el cálculo del caudal, ya que es la mayor población que se registrará asociada a la medida la cual corresponde a 41.694 personas para la zona urbana de

³¹ La información fue entregada a través de correo electrónico por la SISS con fecha 12 de febrero de 2020.

Villarrica y a 5.532 personas para la Ribera Sur, durante el período de evaluación del PDAV. La estimación de la población urbana se obtuvo de las proyecciones de INE (2018). En segundo lugar, se calculó la emisión (caudal) per cápita con el fin de dimensionar la PTAS. Este caudal se obtuvo de los valores reportados por el D.S N° 90 de 2000, que consideran que una persona emite 200 litros al día, con una emisión efectiva del 80% (Carga contaminante media diaria equiv. 100/hab/día)

Con los datos obtenidos para caudal estimado a tratar, se aplican las ecuaciones para el cálculo de los costos del sistema SBR (Ecuación 13. Y Ecuación 14 del presente informe). La Tabla 30 presenta los caudales con los cuales se dimensionó el sistema SBR para el cálculo de los costos asociados a la PTAS de Villarrica.

Tabla 30: Caudal para el dimensionamiento del sistema SBR

Origen del Caudal	Caudal en m ³ /día
Ribera Sur	88,52
Villarrica	667,1

Fuente: Elaboración propia.

6.1.6 Metodología para el sector de Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en área concesionada.

Se evaluó la conexión al sistema de alcantarillado para viviendas que se encuentran dentro del área concesionada de la ciudad de Pucón y Villarrica y que, por diversos motivos, no se han conectado a la red. Esta medida estipula que en un plazo de 2 años todas las viviendas que enfrenten red deberán estar conectadas a sistemas de alcantarillado.

Para la estimación de esta medida se asumirá como supuesto que serán conectadas todas aquellas viviendas de carácter permanente, eso quiere decir, a aquellas viviendas en donde sus propietarios habitan durante todo el año (12 meses). La Tabla 31 presenta el número de viviendas que deberán ser conectadas en un plazo de 2 años.

Tabla 31: Viviendas que enfrentan red para las comunas de Villarrica y Pucón.

Comuna	N° conexiones	N° Habitantes
Villarrica	1.200	3.720
Pucón	400	1.240
Total	1.600	4.960

Fuente: elaboración propia (MMA, 2020b)

Para la estimación de esta medida, primero se debe considerar la emisión asociada al número de viviendas, para esto se utilizan los datos provenientes de INE (2018), los cuales indican que a nivel país una vivienda está compuesta por 3.1 personas. Esto significa que, existen 4.960 personas que emiten hacia el lago sin un sistema formal de tratamiento Tabla 31.

La emisión de Fósforo total se calcula a través de la emisión unitaria (gramos de Fósforo por persona al día), considerando los valores presentados por el DS90/2000 (MINSEGPRES, 2000), el cual establece que una persona emite 1,6 kg de Fósforo/día³².

Para lograr calcular la emisión de todas las viviendas, se establece la Ecuación 15.

$$\text{Emisión viviendas sin conexión} \left(\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right) = \frac{Np * Fe * 365}{10^6} * Edr \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde,

Np: Número de Personas que emiten (hab).

Fe: Factor de emisión dado por el DS90/2000 (gr_{PT}/día/hab)

Edr: Emisión después de la retención natural de los suelos, la cual se estima en un 80% según MMA, 2020^a.

Las eficiencias asociadas a las reducciones están dadas por los sistemas de tratamiento que se emplearán para la PTAS de Pucón y la PTAS de Villarrica, las cuales tratarán estas aguas. Para la primera su eficiencia ha sido estimada en un 90% para Fósforo Total, y se asume que la planta posee capacidad para tratar estas viviendas. Para la segunda, se asume una eficiencia del 100%, esto debido a que la PTAS de Villarrica descarga sus aguas al río Toltén, el cual está fuera del área delimitada para el PDAV, este supuesto se basa en que toda la emisión generada en la cuenca, saldrá de ella.

Aplicando las eficiencias a los valores asociados a la Ecuación 15 Podemos obtener los valores de reducción de emisiones para las viviendas de la zona concesionada que se conectarán al sistema de alcantarillado.

Tabla 32: Reducción de emisiones anuales conexión alcantarillado en zona concesionada para plena implementación, año 2035.

Emisión base (ton/año) 2035	Δ Reducción (ton/año) 2035	Emisión Final (ton/año) 2035
4.22	2.14	2.085

Fuente: elaboración propia en base a (MMA, 2020b)

Para el cálculo de los costos de esta medida se considera información entregada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), quienes estiman costos promedio obtenidos de diversos programas implementados en el país para conectar viviendas rurales. El costo unitario de inversión de presenta en la Tabla 33.

³² Artículo 3 del DS 90/2000, Ministerio Secretaría General de la Presidencia)

Tabla 33: Costos de conexión a red de alcantarillado en USD

Ítems de inversión	Costo de inversión (USD/vivienda)
Conexión Vivienda	1.186,78

Fuente: Elaboración propia. En base a información SISS³³

Respecto a los costos de operación y mantención, estos se han estimado en un 5% de la inversión, para valores anuales, los que corresponden a US\$ 59.3 anuales.

6.1.7 Metodología para el sector de Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural.

El PDAV, a través del Fondo Nacional de Desarrollo Regional, implementará soluciones de tratamiento sanitario para viviendas en zonas rurales, esta medida busca la aplicación de tecnologías de abatimiento que permitan reducir la carga de Fósforo hacia el lago para las fuentes emisoras “Aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural”.

En particular, se otorgarán, en un plazo de 15 años, soluciones para 1350 viviendas de las comunas de Pucón, Curarrehue y Villarrica. El número de viviendas por comuna se detalla en la Tabla 34.

Tabla 34: Número de viviendas que obtendrán solución sanitaria y población a la que afectará.

Comuna	N° Viviendas totales	N° de viviendas al año	N° personas al año
Villarrica	200	13	41
Pucón	500	33	103
Curarrehue	650	43	134
Total	1350	90	279

Fuente: elaboración propia (MMA, 2020b)

La cantidad de personas por vivienda se estima con los datos provenientes de INE (2018), los cuales indican que a nivel país una vivienda está compuesta por 3.1 personas. Esto significa que, considerando 1350 viviendas, se estima que 4185 personas emiten hacia el lago sin un sistema formal de tratamiento. Debido a que la medida será implementada durante todo el periodo del PDAV, esto es entre el 2021 y el 2035, se estima que anualmente se deberán dar soluciones para 90 viviendas, lo que significa una disminución en la emisión anual de 279 personas aproximadamente.

El cálculo de la emisión de Fósforo total se estima a través de la emisión unitaria (gramos de Fósforo por persona al día), considerando los valores presentados por el DS90/2000, el cual establece que una persona emite 1,6 gramos de Fósforo/día³⁴. Para lograr estimar la emisión de todas las viviendas, se utiliza nuevamente la Ecuación 15 de la sección anterior.

³³ ³³ La información fue entregada a través de correo electrónico por la SISS con fecha 12 de febrero de 2020.

³⁴ Artículo 3 del DS 90/2000, Ministerio Secretaría General de la Presidencia)

Respecto a las tecnologías a implementar, se consideró un humedal artificial (*wetland*) con eficiencias de un 70%. Los humedales a considerar en el análisis fueron dimensionados para dar soluciones sanitarias para 2 viviendas. Por lo tanto, considerando el número de viviendas al año que deberán implementar esta solución sanitaria (ver Tabla 34) se requieren 45 humedales al año, para dar solución a las 90 viviendas requeridas, a lo largo del plan esto se traduce en 675 humedales para las 1345 viviendas.

La reducción de emisiones asociada a esta medida, asociada al total de emisiones de línea base del sector al 2035, se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 35: Emisiones al 2035 para el sector aguas residuales domiciliarias sin saneamiento en zona rural.

Emisión anual año 2035 [ton/año]	Reducción anual año 2035 [ton/año]	Emisión Final [ton/año]
7.2	1.2	6

Fuente: elaboración propia en base a (MMA, 2020b)

Respecto de los costos, se estimó un valor de inversión por concepto de construcción del humedal y conducción de las aguas residuales al humedal de US\$ 10.739³⁵ (MMA, 2020b). Considerando que se deben construir 675 humedales en un periodo de 15 años, los costos de inversión ascienden a 7.248.709 US dólares y anualmente el costo de inversión equivale a 483.247 US dólares. Estos son costos de inversión en bruto y consideran una vida útil del humedal de 20 años. Con esta información se calcula el valor presente de la inversión, tal como lo señala la metodología capítulo 2.4. No se consideran costos de operación y mantención, ya que en general, para esta tecnología son insignificantes.

6.1.8 Metodología para la evaluación de costos por aumento en monitoreo

El PDAV implementará un plan de monitoreo para la cuenca, adicional al monitoreo que ya se realiza por la NSCA, en este sentido, para el análisis del presente AGIES de estimarán los costos adicionales de monitoreo. Esta medida considera el aumento de monitoreo para el lago (áreas de vigilancia) y para toda la cuenca aportante (afluentes del Lago). Actualmente, la DGA realiza 4 campañas de monitoreo anuales y el PDAV considera un aumento de 8 campañas adicionales, esto significa que, al año se realizarán 12 campañas (una por mes), para cada una de sus áreas de vigilancia. La Tabla 36 presenta todos los muestreos adicionales a realizar.

Tabla 36: Número incremental de muestreos por área de vigilancia.

Área de Vigilancia	Puntos de Muestreo	Muestras por año	Profundidades
Centro-PEL	1	8	5
LIT-Poza	1	8	3
LIT-Pucón	1	8	3
LIT-Norte	1	8	3
LIT-Villarrica	1	8	3

³⁵ Datos obtenidos en cotizaciones para febrero de 2020.

Área de Vigilancia	Puntos de Muestreo	Muestras por año	Profundidades
LIT-Sur	1	8	3
Cuenca Aportante	40	6	1

Fuente: Elaboración propia.

Respecto de los costos, se obtuvieron a través de cotizaciones con laboratorios especializados (ver Tabla 37). Se considera el análisis de la muestra en laboratorio, la preparación de los informes de resultados y los costos operativos (salidas a terreno para la toma de muestras, 8 vehículos, bencina, viáticos del personal, etc.).

Tabla 37: detalles de costos utilizados para la evaluación de monitoreos adicionales en el PDAV

Detalles del análisis	Costo (UF)	Costo US\$
Clorofila a	0,79	31,25
Fósforo T	0,18	7,12
Fósforo Disuelto	0,18	7,12
Nitrato (NO3)	0,28	11,08
Nitrito (NO2)	0,18	7,12
N. Amoniacal (N)	0,23	9,10
Nitrógeno T	0	0,00
NKT	0,29	11,47
Costo Laboratorio.	2	79,12
Costos operativos		
Vehículos y Comb.	2,4	94,66
Viáticos	1,8	69,61
Honorarios	16,0	623,67
Imprevistos (10%)	2,0	78,79
Costo total Laboratorio	4,13	163
Costo total Operación	20,2	867
Costo total por campaña	24,3	1.030

Fuente: elaboración propia en base a cotizaciones Empresa Análisis Ambientales (ANAM)

Se considera como supuesto que, una campaña corresponderá a un día, y se considerará por consiguiente que la DGA es capaz de realizar todas las mediciones asociadas al lago en una campaña, y todas las mediciones de la cuenca aportante en una campaña. Este supuesto permite calcular los costos de inversión en monitoreo por campaña. Al año se realizarán 24 campañas, 12 campañas para monitoreo del lago y 12 campañas para el monitoreo de la cuenca aportante. Los costos por campaña considerados se presentan en la Tabla 38.

Tabla 38: costos en US\$ por campaña.

Tipo de costo de monitoreo	US\$ Campaña
Costos de Laboratorio	163
Costos operativos	866

Fuente: Elaboración propia.

6.2 Ficha del AGIES

ÍTEM	GLOSA	DESCRIPCIÓN
Identificación	Nombre AGIES	Plan de Descontaminación Ambiental del Lago Villarrica
	Nombre instrumento normativo que da origen al AGIES	Declaración de zona saturada: Decreto Supremo N° 43 de 2018, del Ministerio del Medio Ambiente.
	Tipo de regulación	Plan de Descontaminación Ambiental
	Fecha de término del AGIES	Abril del año 2020
	Alcance geográfico	Comunas de Pucón, Villarrica, Curarrehue y Cunco.
	Instrumento nuevo o revisión	Instrumento Nuevo.
	Área de aplicación	División de Recursos Naturales y Biodiversidad
Metodología	Metodología	Análisis de Costo y Beneficio.
	Normativas consideradas de línea base	Cumplimiento de Resolución de Calificación Ambiental (RCA) para proyectos, Decreto Supremo 90/2000.
	Nivel de evaluación de beneficios	Experimentos de Elección
	Reducción de concentraciones por parámetro	5,52 µg/l de Fósforo Total al año 2035
	Reducción de emisiones por parámetro	110,06 ton/año para el 2035.
	Años de evaluación	15 años, 2021 a 2035
Parámetros	Valor del dólar	718,33 CLP (promedio móvil 20 febrero 2019 a 20 de febrero de Año 2020)
Resultados	Costos estimados en MM USD (valor presente)	104,15
	Beneficios estimados en MM USD (valor presente)	1.892

6.3 Detalles de Costos Piscicultura.

Tabla 39 Costos de inversión y de operación-Mantención para el escenario N°1, en USD dólares

Tipo de Costo US\$ Dólar	Ítems	Escenario 1			
		Pequeña	Mediana	Grande	Muy Grande
Inversión	Módulo Recirculation Aquaculture System (RAS)	201.199,41	579.203,22	1.238.788,22	2.173.323,13
	Línea Tratamiento Riles Coagulación/Floculación + MBBR + Filtro Prensa	248.256,37	334.303,18	452.090,26	601.255,69
	Total Inversión	449.455,78	913.506,39	1.690.878,49	2.774.578,82
Operación y mantención	Costo operación y mantención RAS	59.288,62	138.853,91	277.738,13	474.459,80
	Costo operación y mantención de la línea de tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación, Sedimentador y Reactor Biológico	116.569,36	121.826,66	167.102,27	171.878,31
	Total OyM	175.857,98	260.680,58	444.840,40	646.338,11
Fósforo Total removido [Ton]		1,66	5,22	13,32	17,97

Fuente: Elaboración a partir de (MMA, 2020b)

Tabla 40: Costos de inversión y de operación-Mantención para el escenario N°2, en USD dólares

Tipo de Costo US\$ Dólar	Ítems	Escenario 2			
		Pequeña	Mediana	Grande	Muy Grande
Inversión	Módulo Recirculation Aquaculture System (RAS)	201.199,41	579.203,22	1.238.788,22	2.173.323,13
	Línea Tratamiento Riles Coagulación/Floculación + MBBR + Filtro Prensa	248.256,37	334.303,18	452.090,26	601.255,69
	Costo Humedal	237.004,14	657.119,79	1.390.307,14	2.428.958,58
	Total Inversión	686.459,92	1.570.626,18	3.081.185,63	5.203.537,40
Operación y mantención	Costo operación y mantención RAS	59.288,62	138.853,91	277.738,13	474.459,80
	Costo operación y mantención de la línea de tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación, Sedimentador y Reactor Biológico	116.569,36	121.826,66	167.102,27	171.878,31
	Costo operación y mantención del Humedal	1.510,45	4.747,12	10.357,36	18.341,15
	Total OyM	177.368,43	265.427,70	455.197,76	664.679,26
Fósforo Total removido [Ton]		1,80	5,63	14,19	19,49

Fuente: Elaboración a partir de (MMA, 2020b)

Tabla 41: Costos de inversión y de operación-Mantenimiento para el escenario N°3, en USD dólares

Tipo de Costo US\$ Dólar	Ítems	Escenario 3			
		Pequeña	Mediana	Grande	Muy Grande
Inversión	Módulo Recirculation Aquaculture System (RAS)	201.199,41	579.203,22	1.238.788,22	2.173.323,13
	Línea Tratamiento Riles Coagulación/Floculación + MBBR + Filtro Prensa	176.304,00	237.411,77	321.060,52	426.993,19
	Sistema Lombrifiltro	596.683,51	1.717.703,92	3.673.790,67	6.445.277,82
	Total	974.186,91	2.534.318,91	5.233.639,42	9.045.594,14
Operación y mantención	Costo operación y mantención RAS	58.363,86	137.781,94	276.409,28	472.767,00
	Costo operación del sistema Lombrifiltro	8.911,14	23.767,34	50.260,34	86.564,48
	Costo operación y mantención de la línea de tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación, Sedimentador y Reactor Biológico	108.964,89	113.959,32	156.337,76	160.875,00
	Costo mantención del sistema Lombrifiltro	13.128,32	13.794,01	17.349,74	18.062,54
	Total OyM	189.368,22	289.302,62	500.357,13	738.269,03
	Fósforo Total removido [Ton]	1,67	5,23	13,33	17,99

Fuente: Elaboración a partir de (MMA, 2020b)

Tabla 42: Costos de inversión y de operación-Mantenimiento para el escenario N°4, en USD dólares

Tipo de Costo US\$ Dólar	Ítems	Escenario 4			
		Pequeña	Mediana	Grande	Muy Grande
Inversión	Módulo Reuso	104.623,69	301.185,67	644.169,87	1.130.128,03
	Línea Tratamiento Riles Coagulación/Floculación + MBBR + Filtro Prensa	240.232,24	299.189,32	385.060,59	506.727,55
	Total	344.855,93	600.374,99	1.029.230,47	1.636.855,58
Operación y mantención	Costo operación tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación, Sedimentador y Reactor Biológico	43.686,35	102.313,41	204.649,15	349.601,96
	Costo mantención tratamiento de efluente de retrolavado con Coagulación – Floculación, Sedimentador y Reactor Biológico	85.893,21	89.767,02	123.127,99	126.647,17
	Total OyM	129.579,57	192.080,43	327.777,14	476.249,13
	Fósforo Total removido [Ton]	0,57	2,07	6,58	6,14

Fuente: Elaboración a partir de (MMA, 2020b)