

## INFORME FINAL

# DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE NUTRIENTES EN LOS PRINCIPALES AFLUENTES AL LAGO VILLARRICA, ESTIMACIÓN DE SU CARGA Y PROPUESTA DE MEDIDAS PARA SU REDUCCIÓN.



## Centro de Gestión y Tecnologías del Agua

Informe preparado por el **CENTRO DE GESTIÓN Y TECNOLOGÍAS DEL AGUA**, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Frontera.

Informe autorizado para su presentación

---

**Dr. Juan Carlos Ortega Bravo**  
Director del  
Centro de Gestión y Tecnologías del Agua  
Universidad de La Frontera

Lunes, 5 de marzo de 2018



## EQUIPO DE TRABAJO

1. Dr. Mauricio Zambrano Bigiarini  
Ingeniero civil mención hidráulica  
**Rol: Jefe de proyecto e hidrólogo**  
e-mail: [mauricio.zambrano@ufrontera.cl](mailto:mauricio.zambrano@ufrontera.cl)
2. Dr. Juan Carlos Ortega Bravo  
Ingeniero Ambiental  
**Rol: Coordinación de Proyecto, Modelación matemática y estadística**  
e-mail: [juan.ortega@ufrontera.cl](mailto:juan.ortega@ufrontera.cl)
3. Dr. Gustavo Ciudad Bazaul  
Ingeniero ambiental  
**Rol: Análisis de información y propuestas de mitigación**  
e-mail: [gustavo.ciudad@ufrontera.cl](mailto:gustavo.ciudad@ufrontera.cl)
4. Mercedes Nistal Beleña  
Ingeniera ambiental  
**Rol: Ingeniera de proyecto**  
e-mail: [mercedes.nistal@ufrontera.cl](mailto:mercedes.nistal@ufrontera.cl)
5. Julieta Martínez Torres  
Ingeniero civil en biotecnología  
**Rol: Ingeniera de proyecto**  
e-mail: [julieta.martinez@ufrontera.cl](mailto:julieta.martinez@ufrontera.cl)
6. Francisco Rubilar Rocha  
Ingeniero civil ambiental  
**Rol: Ingeniero de proyecto**  
e-mail: [francisco.rubilar@ufrontera.cl](mailto:francisco.rubilar@ufrontera.cl)
7. Catalina Martínez Pérez  
Tesis Ingeniero civil ambiental  
**Rol: Tesista Modelación**  
e-mail: [c.matinez10@ufromail.cl](mailto:c.matinez10@ufromail.cl)
8. Carolina Meza Valdebenito  
Tesis Ingeniero civil ambiental  
**Rol: Tesista Modelación**  
e-mail: [cmeza2010@alu.uct.cl](mailto:cmeza2010@alu.uct.cl)
9. Erik Cabrera Castillo  
Doctorante  
**Rol: consultor**  
e-mail: [erik.cabrera01@ufromail.cl](mailto:erik.cabrera01@ufromail.cl)



## RESUMEN EJECUTIVO

El Lago Villarrica está ubicado en el extremo sureste de la novena región de La Araucanía, en la provincia de Cautín. El Lago Villarrica determina los procesos y funciones ecosistémicas de la Cuenca del Río Toltén. Actualmente existen antecedentes que sugieren una transición desde una condición de oligotrofia a una de mesotrofia, situación que motivó la elaboración de un proyecto de Plan de descontaminación del Lago Villarrica.

En este contexto, el presente estudio busca determinar la concentración de nutrientes provenientes de fuentes puntuales ubicadas sobre los tributarios al Lago Villarrica, además de las fuentes difusas presentes en la ribera sur del lago, a fin de estimar la carga de nutrientes hacia el lago. Esto, con la intención de aportar datos, tanto para la actualización de un inventario de emisiones como para el diseño de medidas que permitan minimizar el aporte de las fuentes puntuales y difusas que actualmente inciden en la calidad de las aguas del Lago Villarrica.

Para esto, se identificaron los principales tributarios al lago, luego se llevó a cabo 4 campañas de muestreo puntual en 7 puntos ubicados en el lugar de descarga de los cauces afluentes al lago y 21 muestreos en una campaña en diferentes puntos de la cuenca con el fin de establecer condiciones de borde para el desarrollo de modelos de transporte de nitrógeno y fósforo.

Los parámetros muestreados fueron caudal, Temperatura (T, °C), pH, Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Oxígeno disuelto (DO, mg/L), Fósforo Disuelto (P-PO<sub>4</sub>-3, (mg/L), Fósforo Total (PT, mg/L), Nitrato (NO<sub>3</sub>, mg/L), Nitrito, (NO<sub>2</sub>, mg/L), Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>4</sub>, mg/L), Nitrógeno Total Kjeldahl (NKT, mg/L), Nitrógeno Disuelto (ND, mg/L) y Nitrógeno Total (NT, mg/L), con lo cual fue posible ajustar un modelo de transporte, que para el caso, fue utilizado el modelo EPA-WASP.

Los resultados demuestran que, desde los principales cauces aportantes, al lago llega en total 128,5 ton/año de Fósforo total y 1126,8 ton/año de Nitrógeno total. El 44,5% del Fósforo total y el 73,2% del Nitrógeno total proviene de actividades productivas y sanitarias, tales como pisciculturas, aguas servidas con descarga directa y planta de tratamiento de aguas servidas urbanas.

Por otro lado, fue posible estimar las emisiones de fuentes difusas asociadas a fosas sépticas, ubicadas en la ribera sur del Lago Villarrica, para lo cual se recurrió a dos metodologías de cálculo diferentes, una de carácter lineal propuesta por UACH (2009) y una segunda que



involucra aspectos difusivos y dispersivos del transporte de nutrientes en el suelo, lo que se logró al aplicar la primera y segunda ley de Fick.

De esta manera, respecto al aporte de nutrientes desde las fosas sépticas ubicadas en la ribera sur del lago, fue posible determinar que, aproximadamente, tanto las habitaciones usadas para veraneo como las utilizadas de forma permanente, aportan en proporciones similares Nitrógeno y Fósforo total, en una proporción del 52,2% de aporte desde las viviendas de veraneo (P:0,102 ton/año – N:0,499 ton/año) y un 47,7% las de uso permanente (P:0,093 ton/año – N:0,456 ton/año).

Producto de estos resultados, se han propuesto una serie de medidas de mitigación, entre ellas el establecimiento de límites de descarga anual para cada uno de los ríos y esteros afluentes al lago, un plan de reducción de emisiones para fuentes puntuales, la generación de incentivos económicos para la reforestación y forestación de bosque nativo y mantención de zonas de protección ripariana, ampliación del plan regulador intercomunal Villarrica-Pucón y la restricción de la construcción de nueva infraestructura habitacional en algunas zonas de la ribera sur del Lago Villarrica.

Por último, se sugiere continuar esta investigación por 3 años, aumentando la cantidad de puntos de muestreos y la frecuencia temporal de los mismos, de tal forma de levantar información suficiente para implementar de manera adecuada los modelos de transporte desarrollados.

De este modo, para la realización de futuros estudios en la Cuenca del Lago Villarrica se sugiere:

- i. Aumentar la cantidad de puntos de muestreo y frecuencia temporal de los mismos.
- ii. Considerar información actualizada de los usos de suelo de la cuenca, para mejorar la representación del aporte difuso de las subcuencas intermedias correspondientes a cada uno de los tramos simulados en el presente estudio.
- iii. Realizar un estudio en la ribera sur del Lago Villarrica, que caracterice de manera detallada el tipo de suelo y sus propiedades hidrológicas.
- iv. Levantar información públicamente disponible sobre valores fiscalizados en cada una de las fuentes puntuales aportantes en ríos y esteros.
- v. Realizar un monitoreo en el tiempo a las descargas de aguas servidas de Curarrehue (cantidad y calidad de los 7 puntos de descarga).
- vi. Implementar estaciones fluviométricas y puntos de monitoreo de calidad de agua a las salidas de subcuencas que posean fuentes puntuales de nitrógeno y fósforo.



- vii. Implementar piezómetros de control de nivel de aguas subterráneas y de su calidad en la ribera sur del Lago Villarrica, en concordancia con las sugerencias del reciente estudio hidrogeológico de la región de la Araucanía (DGA-ARCADIS, 2016).
- viii. Realizar un levantamiento de información respecto a flujos de descarga, eficiencia de remoción de carga orgánica, nitrógeno y fósforo de los sistemas de tratamiento de aguas servidas de condominios y hoteles existentes en la ribera sur del Lago Villarrica.



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	9
2.	OBJETIVOS DEL PRESENTE ESTUDIO .....	10
3.	METODOLOGÍA.....	11
3.1	Área de estudio .....	11
3.2	Recopilación de antecedentes.....	13
3.2.1	Dirección General de Aguas, 2004.....	13
3.2.2	Universidad Austral de Chile, 2009.....	14
3.2.3	Dirección General de Aguas, 2009.....	15
3.2.4	Litoral Austral, 2010.....	15
3.2.5	Departamento de Economía Ambiental, MMA, 2011.....	15
3.2.6	Universidad Católica de Temuco, 2012.....	16
3.2.7	EcoHyd, 2016.....	17
3.2.8	Universidad del Desarrollo, 2016.....	18
3.2.9	Fuentes puntuales.....	18
3.2.10	Fuentes difusas.....	23
3.3	Selección de cauces aportantes.....	28
3.4	Selección de puntos y períodos de muestreo .....	31
3.5	Estimación de la carga de nutrientes en afluentes al Lago Villarrica.....	36
3.6	Estimación de la carga proveniente desde fosas sépticas de la ribera sur.....	39
3.6.1	Metodología UACH .....	40
3.6.2	Ley de Fick.....	40



3.7	Otras posibles fuentes.....	42
3.8	Criterios para medidas de mitigación .....	42
4.	RESULTADOS.....	43
4.1	Muestreo y determinación de nutrientes .....	43
4.1.1	Comparación de resultados de muestreo con estudios anteriores.....	50
4.2	Transporte de nutrientes en cauces aportantes .....	52
4.2.1	Estero Molco (M1) .....	54
4.2.2	Estero Loncocontraro (M2).....	57
4.2.3	Estero Correntoso (M3) .....	60
4.2.4	Estero Los Chilcos (M4).....	63
4.2.5	Río Trancura (M5) .....	67
4.3	Emisiones desde fuentes difusas. ....	85
4.3.1	Información recopilada desde organismos públicos.....	85
4.3.2	Información recopilada desde sistemas particulares.....	87
4.3.3	Georreferenciación de viviendas. ....	89
4.3.4	Otras fuentes de nutrientes.....	89
4.3.5	Cálculo según metodología UACH. ....	90
4.3.6	Cálculo según Ley de Fick.....	94
4.4	Actualización del inventario de emisiones. ....	103
4.5	Propuesta de medidas de mitigación .....	105
4.5.1	Propuestas para cauces tributarios al lago.....	105
4.5.2	Propuestas para fuentes difusas en ríos y esteros.....	111



4.5.3	Propuestas para fuentes difusas en la ribera sur del lago. ....	111
5.	LIMITACIONES DEL PRESENTE ESTUDIO .....	113
6.	CONCLUSIONES .....	115
7.	RECOMENDACIONES .....	117
8.	REFERENCIAS .....	118
9.	Anexo 1. Minuta selección de pisciculturas.....	121
10.	Anexo 2. Ubicación de puntos de muestreo y aforo. ....	125
11.	Anexo 3. Geometría río Trancura.....	128
12.	Anexo 4. Segmentación de Ribera Sur, Lago Villarrica .....	131



## 1. INTRODUCCIÓN

El Lago Villarrica determina los procesos y servicios ecosistémicos de la Cuenca del Río Toltén. Además, pertenece a una macrorregión de importancia para la conservación de invertebrados acuáticos de agua dulce. Actualmente existen antecedentes que sugieren una transición desde una condición de oligotrofia (baja biomasa fitoplanctónica, alta transparencia del agua y limitada concentración de nutrientes) a una de mesotrofia (nivel intermedio de productividad primaria), situación que motivó la elaboración de las normas secundarias de calidad ambiental (NSCA) para la protección de las aguas continentales superficiales del Lago Villarrica, que tiene por objetivo proteger y mantener la calidad de las aguas continentales superficiales de la cuenca del Lago Villarrica, para prevenir el acelerado aumento de su estado de eutrofización (MMA, 2011).

Existen diversas causas de origen antrópico que pueden afectar directa o indirectamente la calidad de las aguas del Lago Villarrica. Entre éstas destacan la infiltración de aguas servidas desde los sistemas de tratamiento individuales de las viviendas construidas en la orilla sur del lago, el aumento de la población durante el verano (Villarrica y Pucón), la escorrentía superficial proveniente desde la propia cuenca, pisciculturas y poblados presentes aguas arriba del Río Trancura (D.S. N° 19/2013). Debido a esto, el Ministerio de Medio Ambiente y la Dirección General de Aguas han puesto énfasis en el monitoreo y preservación de la Cuenca del Lago Villarrica, considerada una de las principales atracciones turísticas de la región de La Araucanía.



## 2. OBJETIVOS DEL PRESENTE ESTUDIO

El objetivo del presente estudio es determinar la carga de nutrientes de los principales afluentes aportantes al Lago Villarrica. Esto, con la intención de aportar un insumo para la actualización de un inventario de emisiones y diseño de medidas que permitan minimizar su aporte proveniente de fuentes puntuales y difusas, que actualmente inciden en la calidad de las aguas del Lago Villarrica.

Los objetivos específicos del presente estudio son:

1. Medición de nutrientes en cauces aportantes al Lago Villarrica.
2. Estimación de la carga temporal de nutrientes en cada uno de los cauces aportantes al Lago Villarrica.
3. Estimación de emisiones producidas por fuentes difusas aledañas a la ribera sur del Lago Villarrica.
4. Identificación y propuestas de medidas de mitigación aplicables a las fuentes de contaminación identificadas en la investigación.



### 3. METODOLOGÍA

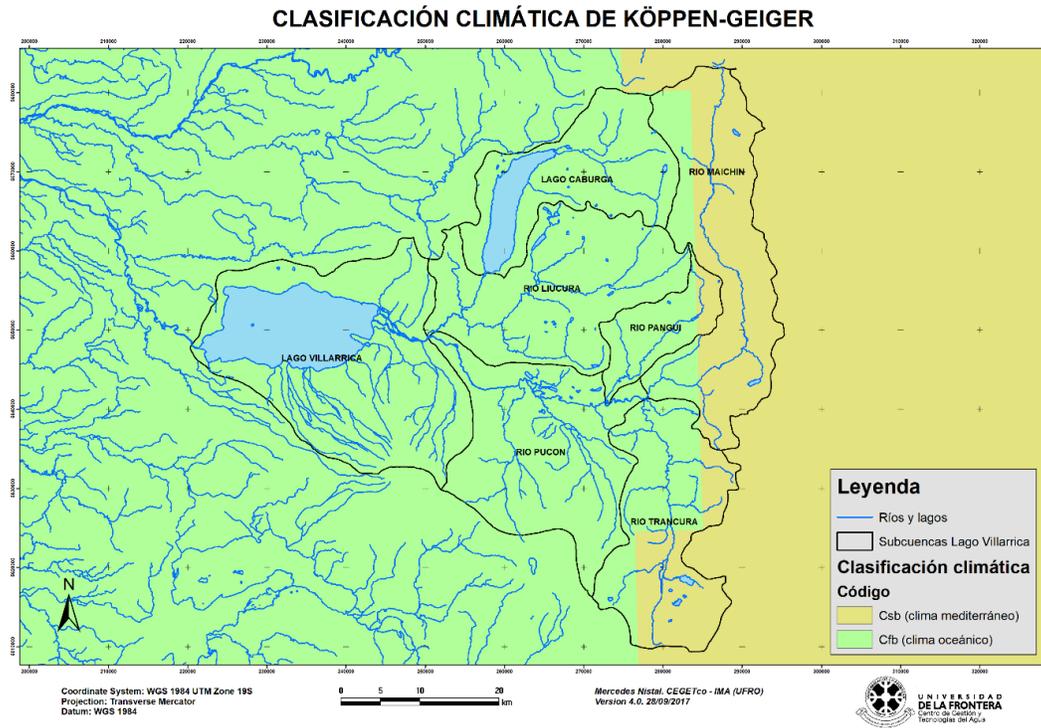
#### 3.1 Área de estudio

En general, la región de La Araucanía presenta características climáticas de dos tipos: un clima templado lluvioso con influencia mediterránea y un clima templado cálido con estación seca corta. El primero registra un régimen pluviométrico que alcanza valores promedios anuales de hasta 2000 mm, con una distribución mensual que registra sus valores máximos en los meses de invierno (JJA) y una disminución en los meses estivales (DEF). Las amplitudes térmicas son de características moderadas en aquellas zonas ubicadas más hacia la costa, aumentando a medida que nos acercamos a aquellas zonas ubicadas en el sector cordillerano (DMC, 2015).

El segundo tipo de clima se observa en la zona intermedia y zona norte de la región. La pluviometría media anual superior a los 2000 mm, con una variación mensual significativa entre marzo y noviembre. Las temperaturas bajo este clima presentan amplitudes moderadas entre el día y la noche, alcanzando valores de hasta los 5°C y registros medios anuales de casi 12°C (DMC, 2015).

Según la clasificación climática de Köppen-Geiger (M. C. Peel, B. L. Finlayson and Rubel, 2007), la cuenca del Lago Villarrica presenta en su gran mayoría clima oceánico (Cfb) contando con lluvias repartidas a lo largo del año. En cambio, en la cabecera de la cuenca (en la parte más oriental de las subcuencas de los ríos Maichín, Pangui y Trancura) se presenta un clima de tipo mediterráneo (Csb) con veranos secos como se observa en la Figura 1.

El Lago Villarrica se encuentra en la cuenca del Río Toltén, la cual se extiende desde la latitud 38°40' por el Norte hasta la latitud 39°40' por el Sur (CADE-IDEPE, 2004). De acuerdo a EcoHyd (2016), el Lago Villarrica corresponde al grupo de los llamados "lagos Araucanos", es el octavo más grande de Chile y es de origen glacial. Se ubica a unos 100 km al sureste de la ciudad de Temuco, IX región de La Araucanía. Su altitud es de 230 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) ocupando una superficie de 176 km<sup>2</sup>. Su largo máximo es de 23 km y su ancho máximo es de 11,2 km. Su volumen promedio es de 21 km<sup>3</sup>, su profundidad media es de 120 m y la profundidad máxima alcanza los 165 m. De acuerdo al estudio realizado por CADE-IDEPE (2004), su alimentación principal le llega a través de río Pucón de 78 km de longitud que proviene del oriente.



**Figura 1.** Clasificación climática de Köppen-Geiger, Fuente (M. C. Peel, B. L. Finlayson and Rubel, 2007).

además del Río Pucón, el Lago Villarrica recibe por su ribera sur numerosos otros cursos de agua de breve recorrido que se generan en la falda NW del volcán Villarrica (CADE-IDEPE, 2004), los cuales corresponden los Esteros Lefún, Huichatro, Molco, Loncotraro, Los Chilcos, Correntoso, Candelaria, Estero Carmelito o Zanjón Seco y río Claro.

De acuerdo a MMA (2011), las principales actividades económicas en la Cuenca del Lago Villarrica son el turismo y la salmonicultura. Otras actividades relevantes para la zona son la ganadería, la agricultura y las plantaciones forestales. El mismo estudio establece que esta región aporta alrededor del 60% del total nacional de ovas, cifra que en el tiempo podría aumentar debido a las óptimas características de sus aguas (ej. temperatura, oxigenación) y que la totalidad de la producción salmoacuícola se desarrolla en pisciculturas emplazadas en las riberas de numerosos ríos tributarios a este sistema lacustre y no en balsas jaulas instaladas en el lago mismo, como sucede en otras zonas.

Respecto a los asentamientos humanos presentes en el área de estudio, MMA (2011) plantea que según el Censo de 2002 los principales asentamientos humanos en la Cuenca del Lago



Villarrica se concentran en las comunas de Villarrica (45.532 habitantes), Pucón (21.107 habitantes) y Curarrehue (6.784 habitantes), equivalente a 73.422 personas (63,4% en la zona rural). De forma más actualizada, INE (2017) presenta una proyección para el año 2017 de 56.139 habitantes para la comuna de Villarrica, 28.609 para Pucón y 7.491 para Curarrehue, lo cual equivale a un incremento poblacional de 23,3%, 35,5% y 10,4% respectivamente para cada comuna. Por otro lado, UDD (2016) estimó para el 2011 en una población flotante media por mes de 174.140 personas para las comunas consideradas, esto utilizando datos de SERNATUR para el año 2012. UDD (2016) plantea un 60% de la población en la cuenca es urbana, esto con mayor proporción en las comunas de Villarrica (67%) y Pucón (65%), según datos del INE para el año 2002.

Respecto a las aguas servidas provenientes de estos asentamientos, sólo Pucón y Curarrehue vierten en cauces aportantes al Lago Villarrica. De estos dos asentamientos, solo Pucón posee una planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) (MMA, 2011).

Respecto de las principales fuentes puntuales de nutrientes aportantes al Lago Villarrica, esas se componen principalmente de dos tipos fuentes puntuales: (1) pisciculturas, (2) planta de tratamiento de Pucón y (3) descarga directa de aguas servidas provenientes del área urbana de Curarrehue (MMA, 2011) y desde fuentes difusas: (4) escorrentías desde diferentes usos de suelo en la cuenca y (5) fosas sépticas ubicadas en la ribera sur del lago.

## 3.2 Recopilación de antecedentes

Para este estudio se realizó una Recopilación de antecedentes de estudios, catastros, entre otros que permitieran realizar una selección de cauces aportantes de relevancia en término del aporte de nutrientes al lago y los puntos de muestreo estratégicos para el caso. A continuación, se desglosa un análisis de los estudios relacionados al Lago Villarrica. Estos se presentan en orden cronológico.

### 3.2.1 Dirección General de Aguas, 2004.

En 2004, la DGA mandata un diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua de la cuenca del río Toltén según su calidad (CADE-IDEPE, 2004). La información asociada al Lago Villarrica en este estudio, se limita a la descripción del nacimiento del río Toltén, al uso de los cursos de agua que aportan al lago (Liucura y Trancura) y la calidad del agua del río Toltén. Las principales conclusiones que se desprenden de este estudio son que la subcuenca del



Trancura corresponde a la hoya hidrográfica del río Pucón (Trancura), desde su nacimiento en las cabeceras en la vertiente occidental de la cordillera, hasta su desembocadura en el Lago Villarrica, incluyendo al río Liucura. La subcuenca tiene un régimen pluvio-nival, con mayores aportes de tipo pluvial, con mayores caudales durante los meses de junio y agosto. Los menores caudales se presentan en los meses de enero, febrero y marzo. También se establece que el uso de Río Trancura se enfoca en la acuicultura, la pesca recreativa y el desarrollo de la biodiversidad y que la calidad del río Toltén está fuertemente determinada por las características de los lagos Caburgua, Colico y Villarrica. Su calidad natural se considera buena, con una preponderancia de metales pesados producto de formaciones geológicas.

### 3.2.2 Universidad Austral de Chile, 2009.

En 2009, la Universidad Austral de Chile realiza un diagnóstico de la calidad de las aguas del Lago Villarrica (UACH, 2009), el cual tuvo por objetivo proponer el anteproyecto de la norma secundaria de calidad y recomendaciones para el monitoreo del Lago Villarrica. Los aspectos estudiados en el informe comprenden los aportes de contaminantes de las fuentes difusas, las pisciculturas, la planta de tratamiento de aguas de Pucón y el aporte de los suelos. Este estudio concluye que la estimación de la carga total del Fósforo y Nitrógeno, durante el año 2008, fueron respectivamente 330,4 ton/año y 1103,1 ton/año. Ello implica, que el Lago Villarrica recibe demasiados nutrientes para mantener un estado oligotrófico y se encuentra en proceso de eutrofización. El mayor aportante de dichos nutrientes son los suelos, seguidos de la planta de tratamiento, las pisciculturas y las fuentes difusas. La investigación arrojó que la calidad del agua en el centro del lago se encontraba aún en un estado oligotrófico, en cambio, en el sector La Poza ya mostraba un estado mesotrófico con tendencia a la eutrofia.

En cuanto al diseño de la norma secundaria, UACH (2009) plantea que los valores promedio anuales de profundidad Secchi oscilen entre los 4 y 9 m, el Fósforo disuelto y total oscilen entre 0,010 y 0,025 mg/l, el oxígeno disuelto sea mayor al 80%, el Nitrógeno disuelto y el total oscilen entre los 0,010 y 0,030 mg/l y la clorofila a no supere los 10 µg/l.

En cuanto a la metodología del monitoreo, UACH (2009) recomienda dividir el lago en 3 zonas: Zona pelágica (toda zona del lago con profundidad superior a los 20 m), Zona litoral (toda zona del lago con profundidad inferior a los 20 m), Zona litoral La Poza (todo cuerpo de agua en la bahía La Poza). Por último, se estimó una carga crítica de Fósforo total de 70-



120 ton/año y de Nitrógeno total de 490-840 ton/año. De acuerdo a esto, en el año 2009, la carga de P se excedía casi tres veces y la de N entre 1,4 y 2,2 veces.

Por último, se presentó un anteproyecto de Norma Secundaria con indicaciones y fundamentación de las áreas de vigilancia, los parámetros y límites normados, la forma de evaluación del cumplimiento de la norma, la metodología y el programa de monitoreo.

### 3.2.3 Dirección General de Aguas, 2009.

El año 2009 la DGA mandata el levantamiento de información para la realización del AGIES NSCA (Applus, 2009). Se recabó información del aporte económico de los sectores productivos de la cuenca, datos de las zonas vulnerables respecto de la aplicación de la norma y los insumos para el método aplicado de evaluación (MAE). El estudio generó información territorial (SIG) de la zona de estudio, índices de vulnerabilidad ambiental, índices de aporte económico, aportes ponderados de N y P de los aportantes al Lago Villarrica, extraídos del informe de la UACH (2009) y aportes ponderados de NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, N total, Fósforo total de los sectores productivos al Lago Villarrica.

El estudio recomienda ejecutar un plan de descontaminación dada la incertidumbre estructural de la cuenca realizando un levantamiento de información a nivel de cuenca o un desarrollo de métodos de escalamiento de datos a escala de cuenca hidrográfica.

### 3.2.4 Litoral Austral, 2010.

El año 2010 Litoral Austral realiza un informe en el cual actualiza la información del estado trófico y de conservación del Lago Villarrica en la estación de primavera (Litoral Austral, 2010). Dentro del informe se presentan tablas de mediciones de parámetros físicos y químicos realizadas durante el estudio. El estudio concluye que es presumible que el Lago Villarrica se encuentra en un estado hipereutrófico con concentraciones de Fósforo total superiores a los 100 µg/l y de Nitrógeno total superiores a los 1.500 µg/l.

### 3.2.5 Departamento de Economía Ambiental, MMA, 2011.

En 2011 el Departamento de Economía Ambiental de la División de Estudios del Ministerio del Medio Ambiente presenta un análisis general de impacto económico y social del anteproyecto de normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas



del Lago Villarrica (MMA, 2011). El objetivo general del informe AGIES Norma Secundaria de Calidad Ambiental (NSCA) es definir los niveles de calidad que prevengan el deterioro o cambio acelerado del estado trófico del Lago Villarrica. En este estudio se detecta que las principales actividades económicas de la cuenca del Lago Villarrica son el turismo, la ganadería, la agricultura y la salmonicultura. El análisis concluye que los principales aportantes son la escorrentía afectada por el tipo de uso de suelo, seguido por las pisciculturas. En segundo orden, la PTAS de Pucón, las aguas servidas de Curarrehue y los pozos sépticos ubicados en el borde del Lago Villarrica y las riberas de sus afluentes.

De acuerdo a este mismo análisis, se prevé que entre los periodos 2012-2021 la concentración de Fósforo total en la zona pelagial podría superar los 10  $\mu\text{g/l}$  mientras que, para el Nitrógeno total, cuyo límite se estableció en 150  $\mu\text{g/l}$  se encontraría aún bajo el límite establecido.

El mismo análisis establece que la implementación de la NSCA implicaría costos por 0,4 MMUSD/año y beneficios por 13 MMUSD/año en un escenario normal (que considera la implementación de una PTAS en Curarrehue, protección de las riberas en los cauces aportantes y mejora en sistemas de tratamiento pisciculturas). También considera que en un escenario optimista (mejoramiento PTAS Pucón y construcción y operación alcantarillado borde lago) se podría alcanzar una concentración de 8,3  $\mu\text{g/l}$  de Fósforo total, esperando un costo de 9 MMUSD/año.

### 3.2.6 Universidad Católica de Temuco, 2012.

El año 2012 la Universidad Católica de Temuco realiza un estudio con la finalidad de analizar la carga de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) de las principales subcuencas aportantes al Lago Villarrica (UCT, 2012). El objetivo del estudio fue estimar la influencia del manejo del suelo y la vegetación asociados a los usos de suelo de las subcuencas, en la producción de agua, sedimentos y nutrientes hacia el lago. Para lograr dicho trabajo se actualizaron las estimaciones de carga de nutrientes (N y P totales) al año 2010 de acuerdo a los usos de suelo, se implementó un modelo hidrológico para predecir los impactos del manejo de suelo y se analizó el efecto de cambios de los usos de suelo en las subcuencas. El estudio considera una retroalimentación del estudio de UACH (2009), pues este sólo considera caudales totales es sus estimaciones. El estudio de UCT (2012) consideró caudales asociados a la escorrentía superficial.



Este estudio recomienda contar con más estaciones de control asociadas a las subcuencas que poseen pisciculturas o con potencial acuícola. También recomienda revisar los factores de conversión utilizados en la proyección de producción, presentados en DIAs y EIAs, además de implementar las NSCA y la evaluación de la asignación de cargas de emisión para las pisciculturas de la cuenca de Pucón.

Por otro lado, propone generar incentivos para la reforestación y forestación de bosque nativo siempre verde en zonas forestables y en áreas de mayor exportación de nutrientes a los cauces, con la intención de disminuir los aportes difusos, para los cuales también se recomienda la mantención de zonas de protección ripariana (25 m a cada orilla según norma forestal).

Una autocrítica a la metodología utilizada, fue el hecho de que el estudio subestima los caudales punta y los pulsos de exportación de sedimentos, debido a la escasez de información meteorológica e hidroclimática de la zona.

### 3.2.7 EcoHyd, 2016.

En el año 2016, un estudio realizado por EcoHyd tuvo por objetivo caracterizar la vegetación ripariana de los principales cauces del Lago Villarrica con el fin de proponer recomendaciones para la restauración y mejoramiento de la zona ripariana (EcoHyd, 2016). El estudio establece que la mayor preponderancia del uso de suelo, en orden descendente, corresponde a bosques, praderas y matorrales. También identifica los principales cambios de uso de suelo entre 1997 al 2014, intercambiando bosques, praderas y matorrales, con alta influencia de uso de suelo antrópico en el Lago Villarrica, el río Pucón y el río Liucura.

EcoHyd (2016) observa un aumento del bosque renoval de tipo denso (roble-raulí) con sectores como el río Correntoso, el río Palgulil, el río Caburgua y el lago Caburgua. En las cercanías al Lago Villarrica se observa mayor presencia de praderas y matorrales, mientras que la presencia de bosque se concentra en el sector del lago Caburgua. También plantea que los sectores que han mantenido la vegetación boscosa desde 1998 son los ubicados entre el Lago Villarrica y el lago Caburgua, con un 80% de cobertura de vegetación boscosa.

Por otro lado, el estudio reconoce a las pisciculturas y las PTAS como fuentes puntuales de contaminación, mientras que las fuentes difusas se relacionan a la escorrentía influenciada por los cambios de uso de suelo y la disminución de la vegetación de ribera. Se presume que los mayores aportes de Fósforo total provienen de los ríos Trancura y Liucura.



### 3.2.8 Universidad del Desarrollo, 2016.

Por último, en el año 2016 la Universidad del Desarrollo realizó un estudio titulado “instrumentos económicos para el control de la contaminación en la cuenca del Lago Villarrica”, en el cual se constata escasa existencia de información relacionada con los niveles de contaminación difusa que afectan al Lago Villarrica. Aun cuando se han desarrollado dos estudios para abordar este problema (UACH, 2009; UCT, 2012), la información con la que se cuenta es insuficiente para desarrollar un análisis económico, como el planteado en esta consultoría. Si bien ambos estudios entregan información sobre los niveles de contaminación difusa, no es posible realizar una diferenciación por tipo de actividad agrícola, lo que es relevante al momento de evaluar una política de reducción de emisiones. El estudio plantea el hecho de que ninguno de los dos estudios se hace cargo de un problema que en apariencia es relevante, como son las emisiones generadas por las PTAS rurales y fosas sépticas. Finalmente concluye que actualmente en la cuenca no existe información que permita dimensionar el real aporte de estas fuentes a la contaminación del Lago.

### 3.2.9 Fuentes puntuales

En la actualidad, las pisciculturas salmoacuícolas corresponden a la única actividad productiva de la cuenca que cuenta con proyectos sujetos al cumplimiento del Decreto Supremo N° 90 con una producción aprobada al año 2011 superior a 2.200 toneladas anuales (MMA, 2011). El sistema de producción más utilizado por las pisciculturas es el de cultivo en tierra con flujo abierto. Este sistema consiste en instalaciones en las cuales el agua proveniente de cursos de agua adyacentes ingresa hacia los estanques donde los peces son mantenidos hasta alcanzar la talla requerida para su traslado a sitios de smoltificación y/o directamente engorda. Aguas abajo, el impacto que genera el cultivo intensivo de salmónidos se asocia a la porción de alimento no consumido y a las materias fecales, residuos caracterizados por un alto contenido de Nitrógeno (N) y Fósforo (P). Actualmente, los sistemas de tratamiento más utilizados en la cuenca contemplan filtros rotatorios con mallas reticuladas filtrantes.

En el caso de las pisciculturas de flujo abierto, no existen estudios específicos que determinen los efectos de este tipo de sistema de smoltificación sobre la calidad del agua de los ríos o esteros (Nieto et al., 2010). Sin embargo, un estudio realizado por Nimptsch et al. (2015) sobre efecto de las pisciculturas en el estero Molco, ubicado en el área de estudio,



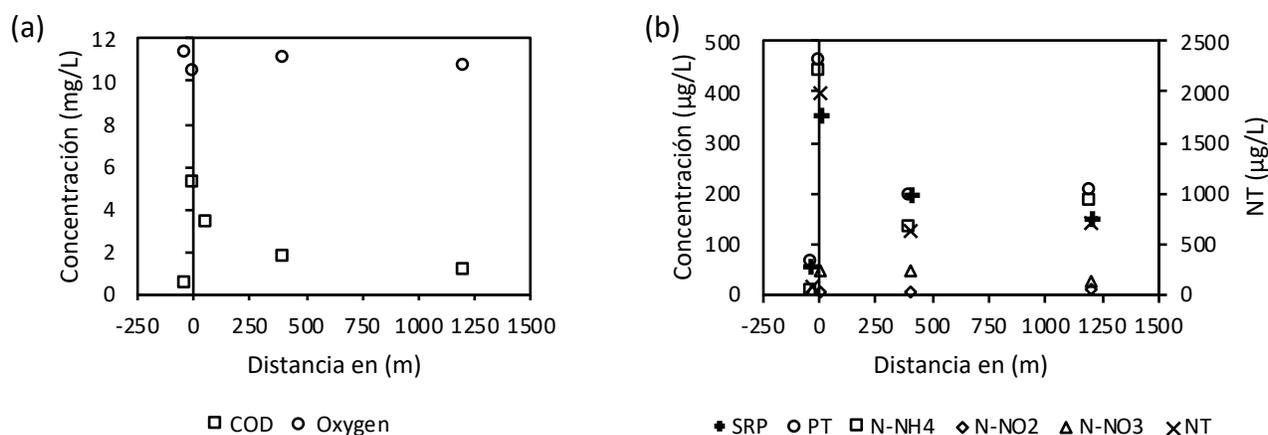
concluye que es probable que existan fuertes efectos para los ecosistemas aguas abajo de las acuiculturas terrestres, también plantean que los efectos adversos de los sistemas acuícolas terrestres pueden ser fuertemente reducidos por el tratamiento adicional del agua. Esto reduciría los efectos negativos sobre el ecosistema, manteniendo al mismo tiempo los efectos positivos como el bienestar laboral y económico. Los muestreos realizados por este estudio revelan un aporte importante de carbono orgánico disuelto, Fósforo y Nitrógeno. Algunos resultados tomados de este estudio se presentan en la Tabla 1 y Figura 2, las cuales muestran que 40 m aguas arriba de la descarga, la calidad de agua en parámetros como carbono orgánico disuelto (COD), Fósforo reactivo disuelto (SRP, por sus siglas en inglés), Nitrógeno amoniacal ( $N-NH_4$ ), Nitrógeno del nitrito ( $N-NO_2$ ), Nitrógeno del nitrato ( $N-NO_3$ ) y Nitrógeno total (NT), aparece en concentraciones menores a las medidas en el punto de descarga (0 m) y las presentadas aguas debajo de la descarga (60 a 2700 m aguas abajo). Esto demostraría que tales condiciones si representarían un riesgo ecológico para el cauce o para el lago al que desemboca.

Por otro lado, Nieto et al. (2010) plantea que estos sistemas productivos (cultivo en tierra con flujo abierto) están considerados como fuentes fijas de contaminación, por lo cual deben cumplir con las normas de emisión vigentes y, por lo tanto, disponer de sistemas y protocolos que minimicen el aporte de nutrientes en los cuerpos de agua receptores. Para este propósito, ha sido posible establecer sistemas de retención de sólidos diseñando estanques de decantación a costos razonables. Esto, considerando que las pisciculturas de flujo abierto utilizan grandes volúmenes de agua que circulan permanentemente por el sistema, generando altas tasas de dilución, lo que resulta en el cumplimiento de la mayor parte de los parámetros contenidos en la norma de emisión (D.S. 90 de 2000 del MINSEGPRES). Sin embargo, esta regulación sólo se basa en la concentración de los compuestos, pero no en su carga total. Esta última es la que podría generar problemas de enriquecimiento orgánico y efectos acumulativos lejos de la fuente emisora, debido a los altos volúmenes de agua vertidos vía emisarios a cuerpos de agua receptores superficiales, como ríos. También debe ser considerado que los sistemas de retención de sólidos no son suficiente para mitigar el efecto de contaminantes en solución como el carbono orgánico disuelto (COD). Otro estudio realizado por Kamjunke et al. (2017) respecto al efecto de las emisiones de COD sobre cuatro ríos: Río Molco (Molco Alto), Río Peuco (Melipeuco), Río Huililco (Catripulli), Río Niltre (Niltre, Panguipulli) demuestran (Figura 3) que las concentraciones de COD son superiores a las del sitio de control aguas arriba de la descarga, lo cual demuestra el problema de los actuales sistemas de tratamientos en las pisciculturas.

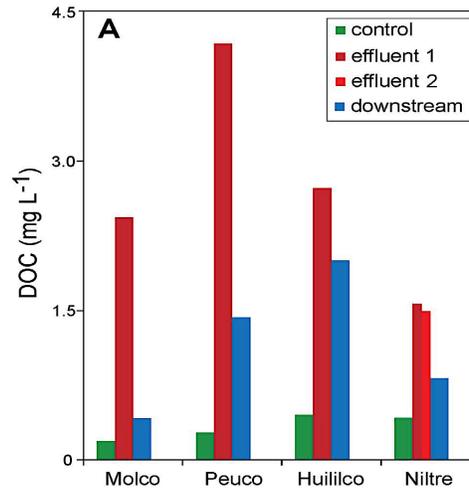
**Tabla 1.** Datos de descarga y calidad de agua a diferentes distancias desde el punto emisor (control antes de la descarga: -40 m; efluente: 0 m; 60 a 1200 m distancia desde el efluente) en el estero Molco.\* (información tomada y adaptada de Nimptsch et al. (2015)).

Distancia desde el efluente (m)	COD (mg/L)	Oxígeno (mg/L)	Turbidez (NTU)	SRP ( $\mu\text{g/L}$ )	TP ( $\mu\text{g/L}$ )	N-NH <sub>4</sub> ( $\mu\text{g/L}$ )	N-NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g/L}$ )	N-NO <sub>3</sub> ( $\mu\text{g/L}$ )	TN ( $\mu\text{g/L}$ )
-40	0.5	11.3	0.4	51.7	58.9	5.6	-	46.3	79.4
0	5.2	10.4	2.0	350.2	461.8	439.8	4.5	237.3	1993.0
60	3.3	-	-	-	-	-	-	-	-
400	1.7	11.0	1.0	194.0	195.0	127.9	3.5	237.3	610.1
1200	1.1	10.7	0.5	147.8	200.9	184.0	10.4	135.0	698.0

\*Datos tomados el 15 de octubre de 2013.



**Figura 2.** Concentración de parámetros antes, en y después del punto de descarga de la Piscicultura Molco en Estero Molco. (a) Presenta Carbono orgánico Disuelto y Oxígeno disuelto en mg/L. (b) Presenta Fósforo reactivo disuelto (SRP, por sus siglas en ingles), nitrógeno amoniacal, nitrógeno del nitrito y nitrógeno del nitrato en el eje principal, el Nitrógeno total se presenta en eje secundario por problemas de escala. (información tomada y adaptada de Nimptsch et al. (2015)).



**Figura 3.** Concentración de carbono orgánico disuelto (DOC, por sus siglas en inglés en el estudio) del sitio de control (aguas arriba), efluente y aguas debajo (2700 m) de las pisciculturas muestreadas. Figura tomada de Kamjunke et al. (2017).

El estudio realizado por UACH (2009) establece que la producción de Salmónidos de las pisciculturas que se encuentran activas hasta el año 2008 en la cuenca del Lago Villarrica se basa en ovas, alevín, smolt, juvenil, adulto, reproductor. Para la determinación de los aportes de Nitrógeno y Fósforo de las pisciculturas en los afluentes del Lago Villarrica, se empleó un modelo en el cual establece una relación entre la cantidad de alimento suministrado, el peso promedio de los peces al inicio y al final de la etapa considerada y los contenidos de Fósforo o Nitrógeno en los peces. El modelo utilizado por UACH (2009) solo fue aplicado para la producción de alevines y smolt. La Tabla 2 presenta un resumen de los cálculos. Para el cálculo se consideró la producción de 50.000.000 alevines y 6.000.000 smolt, lo cual resulta en 3,4 ton/año de P total y 115,5 ton/año de N total.

**Tabla 2.** Aportes totales de Fósforo y Nitrógeno (particulado y soluble), por actividad de piscicultura, considerando una biomasa de 275 ton de alevines (5,0 g) y 420 ton de smolts (70,0 g). Tomado de UACH (2009).

Etapa	Fósforo (kg)		Nitrógeno (kg)	
	Particulado	Soluble	Particulado	Soluble
Alevines	679	871	2.475	49.500
Smolts	755	1.064	3.024	60.480
Total	1.434	1.935	5.499	109.980



Respecto a las aguas servidas, y tal como ya se mencionó anteriormente, sólo Pucón posee una planta de tratamiento de aguas servidas (PTAS) operada por la empresa Aguas Araucanía, esta planta corresponde a un SBR (*Sequential Batch Reactor*) convencional de cuatro reactores, el cual descarga al río Claro, afluente del Lago Villarrica. De acuerdo a MMA (2011), si bien el sistema de tratamiento cumple con lo estipulado en el D.S. N° 90, la carga de nutrientes que recibe el Lago Villarrica no es nula, ya que la remoción de Fósforo y Nitrógeno es cercana a 60% y 70%, respectivamente, para un caudal promedio de 130 l/s, por lo cual, esta planta estaría aportando Nitrógeno y Fósforo al lago por medio del río Claro. La PTAS está ubicada a 1 km en línea recta del lago en las coordenadas WGS 84 UTM Huso 19 Sur (este, norte) 244496, 5649705. Según UACH (2009) este aporte correspondería a 4,9 ton/año de P total y 80,8 ton/año de N total.

Por otro lado, el río Trancura que es uno de los principales tributarios al Lago Villarrica, y según lo constata Applus (2009), en Curarrehue el sistema público de alcantarillado no dispone de tratamiento de aguas, por lo cual éstas son descargadas directamente en siete puntos sobre el río Trancura, la Tabla 3 y Figura 4 presentan la ubicación de los puntos de descarga en Curarrehue.

**Tabla 3.** Ubicación de descargas puntuales de aguas servidas en Curarrehue. Fuente: Municipalidad de Curarrehue, 2017.

ID	Detalle	Coordenadas*	
		X	Y
1	Aldea	277242	5640226
2	Pulongo	277255	5640150
3	Estadio1	277561	5639904
4	Estadio2	277410	5639990
5	Ex Villa Puesco	277610	5639391
6	Puente a Reigolil1	277438	5639621
7	Puente a Reigolil2	277469	5639627

\*Sistema de Coordenadas WGS 84 UTM Huso 19 Sur.

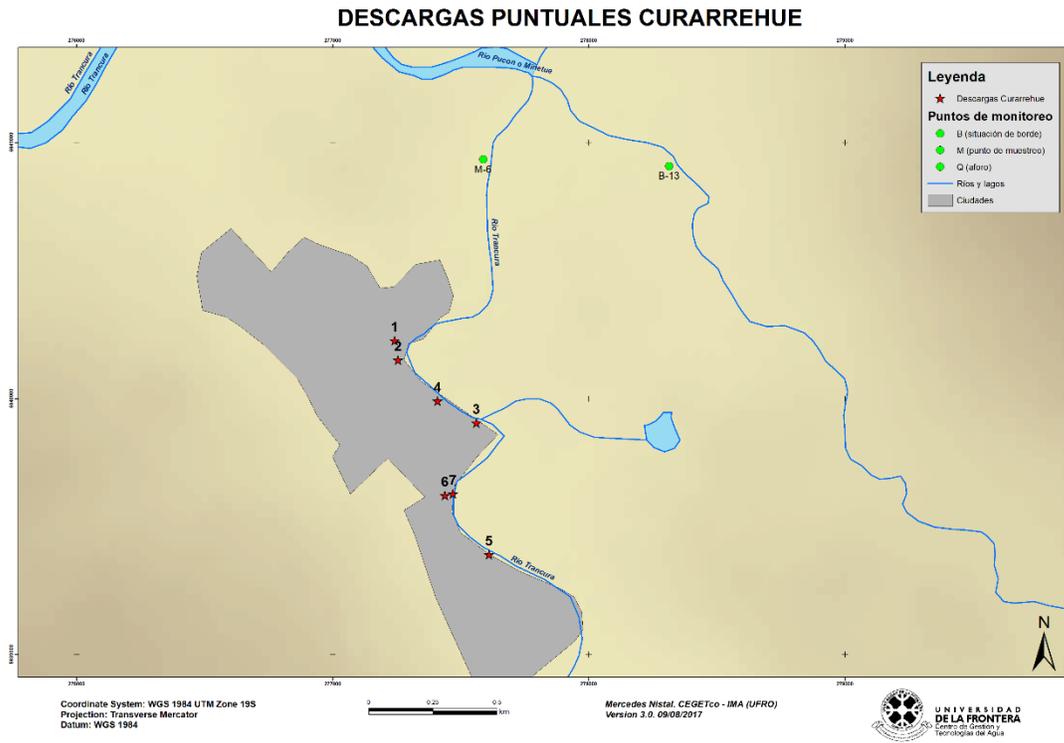


Figura 4. Descargas puntuales de las aguas servidas de Curarrehue.

### 3.2.10 Fuentes difusas

Respecto del aporte por escorrentías desde diferentes usos de suelo en la cuenca, el trabajo realizado por la Universidad Católica de Temuco (UCT, 2012) tuvo por objetivo estimar la influencia del manejo del suelo y la vegetación asociados a los usos de suelo de las principales subcuencas del Lago Villarrica, en la producción de agua, sedimentos y nutrientes hacia el lago.

UCT (2012) utilizó el modelo hidrológico SWAT para simular 3 escenarios: actual, favorable y desfavorable. El área de estudio utilizada correspondió a las principales subcuencas aportantes al Lago Villarrica, éstas son Maichin, Pangui y Trancura. En la Tabla 4 se establece que el uso de suelo urbano no abarca una gran superficie, sólo un 0,2%, mientras que el bosque nativo, renoval y pradera abarca un 75,2%.

También, la Tabla 5 presenta un resumen en el que UCT (2012) establece la concentración de nutrientes aportados en la cuenca por cada uso de suelo, en el cual se observa que la principal actividad aportante de Nitrógeno total es la actividad agrícola, con un índice de exportación de 27%. La Tabla 4 muestra que la superficie utilizada para esta actividad es tan solo de 20 ha, lo cual da una relación aporte/superficie de 15,7  $\mu\text{g/L*ha}$ , que contrasta con el aporte de bosque nativo, matorral y pradera, que alcanzan valores de 0,0007  $\mu\text{g/L*ha}$ , 0,0066  $\mu\text{g/L*ha}$  y 0,0038  $\mu\text{g/L*ha}$  respectivamente. Respecto al Fósforo total, el uso de suelo agrícola presenta un índice menor (8,0%) frente a los otros usos, mantiene una relación de 1,44  $\mu\text{g/L*ha}$ , lo cual es mayor que los usos Nieve y Suelo desnudo (0,011  $\mu\text{g/L*ha}$  y 0,0009  $\mu\text{g/L*ha}$  respectivamente).

Por otra lado, Applus (2009) y UCT (2012) presentan un cálculo de aporte por subcuencas, el que se resume en la Tabla 6. UCT (2012) presenta resultados un 20% menores que los mostrados por Applus (2009) para el Nitrógeno total. Respecto al cálculo de Fósforo total, las diferencias son más significativas, llegando a ser, en promedio, 55% menores. La única singularidad en la comparación de los reportes es que en el caso de la subcuenca Quelhue, UCT reporta un aporte de Fósforo total 29,5 ton/año mayor que los 5,22 ton/año reportado por Applus.

**Tabla 4.** Categorías de uso del suelo en las 3 principales subsubcuencas (Maichin, Pangui y Trancura) aportantes al Lago Villarrica al año 2007. Tomado y adaptado de UCT (2012).

	Uso de suelo	Superficie (ha)	Superficie (%)
1	Agua	23.457	8,0%
2	Bosque nativo	93.258	31,9%
3	Matorral	27.094	9,3%
4	Nieve	6.069	2,1%
5	Plantaciones exóticas	3.201	1,1%
6	Pradera	52.382	17,9%
7	Suelo desnudo	12.365	4,2%
8	Renoval	74.481	25,4%
9	Agrícola	20	0,0%
10	Urbano	440	0,2%
	Total	292.767	100%

**Tabla 5.** Índices de exportación de nutrientes por categoría de uso de suelo. Tomado y adaptado de UCT (2012).

Usos suelo	Nitrógeno total (µg/L)	Nitrógeno total (%)	Fósforo total (µg/L)	Fósforo total (%)
1 Agrícola	314,7	27,1%	28,7	9,4%
2 Agua	95,6	8,2%	8,6	2,8%
3 Bosque nativo	67,3	5,8%	9,8	3,2%
4 Matorral	180,0	15,5%	15,1	4,9%
5 Nieve	67,8	5,8%	67,3	22,0%
6 Plantación	94,8	8,2%	30,1	9,8%
7 Pradera	199,1	17,2%	35,3	11,5%
8 Renoval	73,3	6,3%	44,0	14,4%
9 Suelo desnudo	67,8	5,8%	67,3	22,0%

**Tabla 6.** Comparación de reportes de emisiones de fuentes difusas por subcuencas.

Subcuencas	UACH (2009)		UCT (2012)	
	Nitrógeno total (ton/año)	Fósforo total (ton/año)	Nitrógeno total (ton/año)	Fósforo total (ton/año)
Maichin	168,53	54,27	110,26	26,02
Trancura	101,84	40,60	76,14	23,20
Caburga	104,32	39,77	103,22	27,36
Liucura	103,86	35,65	80,39	16,81
Pangui	37,77	13,14	27,53	5,61
Pucón	83,70	32,94	115,23	47,42
Palguín	108,94	44,25	86,12	29,12
Quelhue	12,89	5,22	10,44	29,50
Pucón-El claro	25,13	6,74	18,48	4,26
Ribera norte	29,97	7,69	-	-
Volcán Villarrica	15,03	4,76	-	-
Candelaria	20,56	6,46	-	-
Molco	15,44	4,96	-	-
Huincacara	26,49	5,69	-	-
Lago Villarrica	35,78	14,49	-	-
Lago Caburga	104,9	4,25	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>900,74</b>	<b>320,88</b>	<b>627,81</b>	<b>209,31</b>



Respecto a las fosas sépticas, el estudio realizado por UCT (2012) no considera el aporte de las fosas sépticas en la ribera sur del Lago Villarrica. Los escenarios evaluados en este estudio se centran, en su mayoría, en la forestación nativa y en la expansión agropecuaria. Por otro lado, el estudio realizado por UACH (2009) se refiere a las casas de verano como cargas artificiales difusas que aportan nutrientes al cuerpo de agua en estudio. Para sus cálculos considera las construcciones de la ribera sur del Lago Villarrica (Ruta S-199 Villarrica- Pucón), y contabilizó todas las construcciones desde el lago hasta 100 m hacia la carretera, ya que supuso que las distancias mayores a éstas, los nutrientes serían captados por la vegetación existente.

A través de encuestas en los condominios Puerto Pinar, La Puntilla y Margomalal UACH (2009) estimó que la población visitante reside en el lugar aproximadamente 60 días al año y que el 10% ocupa o vive en el lugar de manera permanente. También establece que en promedio cada casa o departamento alberga una cantidad de 6 personas durante el tiempo de ocupación. Finalmente, para realizar los cálculos pertinentes UACH (2009) utiliza la Ec. 1 la cual considera que una persona al día aporta 4,1 g de Fósforo y 20 g de Nitrógeno.

$$J_a = g \times (1 - R.S.) \times \text{Hab} \times T \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $g$  corresponde al aporte diario de una persona de Fósforo o Nitrógeno.  $(1-R.S.)$  corresponde al coeficiente de retención del suelo de la salida de un tanque séptico. Para este caso particular se considera  $R.S.$  igual a 0,20.  $\text{Hab}$  corresponde al número de habitantes de la franja costera y  $T$  corresponde al tiempo de residencia de los habitantes en días/año.

UACH (2009) estableció que para el 2009 un total de 620 casas existían en la ribera sur del Lago Villarrica, con una permanencia en época estival de 3.720 personas por un período de 60 días. Esto entrega como resultado un aporte de 0,732 ton de Fósforo y 3,571 ton de Nitrógeno al año. A esto se adiciona el 10% de personas que habitan de manera permanente en el lugar, lo que corresponde a 372 personas con un aporte total de 0,445 ton de Fósforo y 2,172 ton de Nitrógeno al año. De esta manera, se calcula que el aporte total de Fósforo que llega al Lago Villarrica en forma difusa alcanza un total de 1,2 ton/año y el de Nitrógeno en 5,7 ton/año.

Para la obtención de estos datos, se omitieron los condominios La Puntilla y Puerto Pinar puesto que reúnen, transportan y descargan sus aguas hacia la red de alcantarillado de la ciudad de Villarrica.



Los aportes generados por las fosas sépticas ubicadas a 100 m del lago, según lo dispuesto en el informe UACH (2009), no serían el mayor problema de contaminación hacia el lago ya que no se compara con las emisiones provocadas por el cambio de uso de suelo, emisiones de 320,9 ton P/año y 900 ton N/año. El mal manejo de la vegetación y/o suelos de la cuenca tendrían gran implicancia en el aumento del nivel trófico del lago (UACH, 2009).

Por otro lado, el estudio realizado por la Universidad del Desarrollo (UDD, 2016) tuvo por objetivo proponer instrumentos económicos para el control de la contaminación en la cuenca del Lago Villarrica. Con respecto a las fuentes difusas, analizó la información entregada en los estudios realizados por la Universidad Austral de Chile (UACH, 2009) y por la Universidad Católica de Temuco (UCT, 2012).

El estudio señala que las comunas de Villarrica y de Pucón incrementaron su población entre los años 2002 y 2012, un 31% y 58% respectivamente. Tal crecimiento poblacional, sumado al interés de cubrir la demanda de lugares de estancia para la población flotante, genera una presión sobre el cambio de uso de suelo y un aumento en el nivel de contaminación difusa si estos proyectos no están conectados con el sistema de alcantarillado.

UDD (2016), al igual que los estudios anteriores, indica que la principal fuente difusa corresponde a actividades silvoagropecuarias, debido a que el 87% de las hectáreas disponibles están destinadas a este tipo de actividades. Referente a las fosas sépticas, señala que no existe suficiente información para cuantificar su aporte a la contaminación del Lago Villarrica.

UDD (2016) concluye que la información disponible es insuficiente para desarrollar un análisis económico. No es posible realizar una diferenciación por tipo de actividad agrícola, no existen estudios acerca de las emisiones generadas por las PTAS rurales ni tampoco por las fosas sépticas. Por lo tanto, no es posible dimensionar el real aporte de estas fuentes a la contaminación del lago.

Para finalizar, UDD (2016) no entrega mayor información acerca de las fosas sépticas como fuentes difusas que aportan nutrientes al Lago Villarrica. Sin embargo, reconoce la importancia y lo necesario que es ahondar en este punto.



### 3.3 Selección de cauces aportantes

Los cauces tributarios son todos aquellos ríos, esteros y canales que desembocan en ríos de mayor envergadura. Para este trabajo se consideraron todos los ríos, esteros y tributarios que se encuentren en la ribera sur del Lago Villarrica, que tengan como afluente al Lago Villarrica y/o que posean una fuente puntual, los cuales abarcarán desde el estero Lefún o Conquil hasta el río Pucón o Minetúe.

Se estableció la ribera sur debido a que los cauces ya nombrados se encuentran posiblemente afectados por la mayoría de las fuentes puntuales que se ubican a lo largo de la cuenca del Lago Villarrica, entre las fuentes puntuales se encuentran las pisciculturas, PTAS de Pucón y las aguas servidas de Curarrehue.

Las actividades de la piscicultura están relacionadas con la producción de ovas y alevines de especies salmónidas, las fuentes difusas pertenecen a todas aquellas actividades económicas derivadas de la agricultura y ganadería que se encuentran en las diferentes subcuencas de la cuenca del Lago Villarrica.

En la Tabla 7 se observan las pisciculturas de interés que se encuentran en la cuenca del Lago Villarrica, de las 15 que se observan en la tabla, solo 12 se encuentran actualmente activas. De acuerdo a la solicitud hecha por la Seremi de Medio Ambiente en la Minuta de Selección de Pisciculturas de la Cuenca, con fecha 28 de abril, se seleccionaron 16 pisciculturas a considerar en el modelo e inventario de emisiones (ver Anexo 1. Minuta selección de pisciculturas), dentro de las cuales se encuentran las pisciculturas “Reproductores Curarrehue (Catripulli)” y “Curarrehue (Catripulli)”, los cuales al ser visitados en terreno corresponden a una sola instalación en terreno, de esta forma las 16 pisciculturas consideradas originalmente se reducen a 15.

Como fuentes puntuales, además de las pisciculturas, se considera la planta de tratamiento de aguas residuales de Pucón y la descarga directa de aguas servidas de Curarrehue. La Planta de Pucón cuenta hasta el año 2020 con una previsión de uso de alcantarillado anual para 47.596 habitantes y para el mes de enero y febrero de 64.476 habitantes con caudales medios de 250,1 l/s y 279,6 l/s respectivamente (Aguas Araucanía, 2011). Curarrehue contemplaba la construcción de una PTAS para los años 2011 y 2012 (Isla et al., 2010) pero de las 34 plantas de tratamientos que están inscritas en la Superintendencia de Servicios Sanitarios en la IX región de La Araucanía actualizado al 22 de mayo del 2017 no se encontró información pertinente sobre algún tipo de planta de aguas servidas en Curarrehue (SISS,



2017). Por lo tanto, en el área urbana de Curarrehue, a diferencia de lo que ocurre en las otras comunas del país y la región, el sistema público de alcantarillado no dispone de tratamiento de aguas, por lo cual éstas son descargadas directas en siete puntos sobre el río Trancura, uno de los principales ríos de la red hídrica de drenaje del Lago Villarrica (Applus, 2009).

La selección de cauces aportantes en la ribera sur se realizó en función de la presencia o no de fuentes puntuales, en este caso pisciculturas, PTAS Pucón y AS Curarrehue. Por tal razón se seleccionaron los esteros Lefún (o Conquil), Molco, Loncocontraro, Los Chilcos, Correntoso y Río Claro, y se descartaron los esteros Huichato, Candelaria, Carmelito (o Zanjón Seco), y dos esteros con nombres no identificados.

Para el caso del Río Trancura, se consideraron todos los afluentes principales, como Río Turbio, Río Liucura, Río Cavisañi, Río Maichin, Río Panguí, Río Panguil y Estero Llafenco y sus respectivos tributarios.

Tal como se aprecia en la Figura 5 y Esquema topológico de la Figura 6.

**Tabla 7.** Identificación de pisciculturas en la cuenca del Lago Villarrica<sup>(1)</sup>

ID	Nombre de la Empresa	Nombre de Fantasía	Coordenadas <sup>(2)</sup>		Operativa <sup>(3)</sup>	Inicio de Actividades <sup>(3)</sup>
			X	Y		
P1	Soc. Fundo La Cascada Ltda. / Granja Marina Tornagelones S.A.	Los Chilcos	235318	5642971	si	1993
P2	Salmones Multiexport S.A.	Molco	233215	5641202	si	2001
P3	Trusal S.A./ Aquagen Chile S.A.	Loncotraro	234923	5644894	si	1992
P4	Soc. Comercial Agrícola y Forestal Nalcahue Ltda.	Chehuilco	232997	5643583	si	1996
P5	Soc. Fundo La Cascada Ltda. / Granja Marina Tornagelones S.A.	La Cascada	235616	5643981	si	1998
P6	Piscicultura Aquasan S.A./Aquachile S.A.	Quetroleufu	255549	5650113	si	1999
P7	Piscicultura Aquasan S.A./Aquachile S.A.	Caburgua I	254866	5652694	si	1999
P8	Piscícola Huililco Ltda.	Ojos del Caburgua	255325	5652759	si	1996
P9	Enrique Castillo Colihueque	Carileufu	255295	5652547	no	2011
P10	Pacific Star / Trusal S.A.	Quimeyco	254660	5652757	si	2000
P11	Exportadora Los Fiordos Ltda.	Curarrehue	268561	5637590	si	1989
P12	Troutlodge Chile S.A. / Salmones Multiexport S.A./Salmones Aysen S.A. /Salmones Caletabay S.A.	Catripulli	269148	5636423	si	1997
P13	Inversiones Selknam SPA	Rinconada	267034	5637473	no	1997
P14	Piscicultura Aquasan S.A./Aquachile S.A.	Caburgua II	255566	5649965	si	2002
P15	Ricardo Massmann Schilling	Alto Lefún	229876	5641089	si	Sin información

<sup>(1)</sup> Información proporcionada por el Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura/Secretaría regional Ministerial del Medioambiente, región de la Araucanía, en abril 2017.

<sup>(2)</sup> Sistema de Coordenadas WGS 84 UTM Huso 19 Sur. Tomadas de imágenes satelitales en GIS -> mayo 2017.

<sup>(3)</sup> Información tomada del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), consultada en agosto de 2017 y del listado de las producciones de las pisciculturas de la región de La Araucanía entre 2011 y 2016, información proporcionada por Sernapesca el 24 de enero de 2018.

### 3.4 Selección de puntos y períodos de muestreo

Los puntos de muestreo corresponden a dos tipos, muestras tipo “M” correspondiente a muestreos de 4 campañas distribuidas en el tiempo que dura este estudio (6 meses) y muestras tipo “B” correspondientes a muestras de las condiciones de borde (aguas arriba) desde el punto de intervención de alguna fuente puntual en los cauces considerados en este estudio, las Tabla 8 y Tabla 9 presentan los muestreos según fecha y parámetros considerados.

La Figura 5 presenta la distribución espacial de las muestras en el área de estudio. En algunos puntos sólo se caracterizó el caudal de los cauces aplicando un código en el mapa con la letra “Q”. También en el Anexo 2 es posible observar con más detalle la ubicación de cada punto antes descrito.

La Figura 6 presenta un esquema topológico del área de estudio, indicando puntos de muestreo (M-n, B-n), ubicación de fuentes puntuales como Pisciculturas, PTAS Pucón y AS Curarrehue, puntos de aforo extras levantados en terreno (Q-n), estaciones de caudal DGA (Q) y estaciones meteorológicas de temperatura y precipitación (T/PP).

La selección de los períodos de muestreo se llevó a cabo bajo la consideración de la estacionalidad del área de estudio, intentando considerar datos de invierno, primavera y verano con cuatro campañas de monitoreo distribuidas en un período de aproximadamente 6 meses a partir de julio del año 2017.

La información obtenida de las campañas de monitoreo permitió realizar una comparación con la información contenida en estudios anteriores en la cuenca del Lago Villarrica

Las fuentes puntuales fueron caracterizadas respecto de los parámetros típicos de la actividad productiva que desarrollan según lo establecido en el D.S. N°90/00, para la estimación de los aportes a los cauces tributarios al Lago Villarrica. También fue revisada la información contenida en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes RETC y el estudio UDD (2016).

Las fechas de muestreo se presentan en la Tabla 8 y la Tabla 9 presenta el desglose del muestreo de calidad de aguas correspondiente, el cual considero parámetros físico-químicos como Temperatura (T, °C), pH, Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Oxígeno disuelto (DO, mg/L), Fósforo Disuelto (P-PO<sub>4</sub>-3, (mg/L), Fósforo Total (PT, mg/L), Nitrato (NO<sub>3</sub>, mg/L), Nitrito, (NO<sub>2</sub>, mg/L), Nitrógeno Amoniacal (N-NH<sub>4</sub>, mg/L), Nitrógeno Total Kjeldahl (NKT, mg/L), Nitrógeno



Disuelto (ND, mg/L) y Nitrógeno Total (NT, mg/L). Esto se llevó a cabo acorde a lo establecido en las Normas Secundarias de Calidad de Ambiental (NSCA) para la protección de las aguas continentales del Lago Villarrica, y según las metodologías de análisis establecidas en el programa de medición y cumplimiento de la calidad ambiental elaborado por la SMA (Res. 671/2016) en un laboratorio acreditado por la NCh. 17025. En terreno, los parámetros como temperatura, pH, conductividad, turbiedad y oxígeno disuelto, se levantaron utilizando un equipo multiparamétrico *Hanna Instruments 9829*.

**Tabla 8.** Fechas de campañas de monitoreo año 2017.

Mes	1	2	3	4	5	6	7
Muestra	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero 2018
1 <b>Tipo M</b>	-	-	Mar-26	-	Mié-22	Mar-19	Mié-23
2 <b>Tipo B</b>	-	-	Mar-26	-	-	-	-

**Nota:** **M** corresponde a muestras de 4 campañas y **B** corresponde a muestras de 1 sola campaña en condiciones de borde.



**Tabla 9.** Muestreos según día y parámetros considerados.

Punto de muestreo	Fecha muestreo	Parámetros	Observación
M-1, M-2, M-3, M-5, M-7, B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-16, B-17	31-jul-2017	T, pH, Cond, OD, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , N-amoniacal, N-org,	Estos análisis se repitieron por inconsistencias en la analítica. Esto con fecha 26 de septiembre.
M-4, M-6, B-6, B-7, B-8, B-9, B-10, B-11, B-12, B-13, B-14, B-15, B-19, B-20	01-ago-2017	Nitrógeno total, P-disuelto, orto-P, Fósforo total, Chl-a	
M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7, B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6, B-7, B-8, B-9, B-10, B-11, B-12, B-13, B-14, B-15, B-16, B-17, B-19, B-20.	26-sep-2017	T, pH, Cond, OD, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , N-amoniacal, N-org, Nitrógeno total, P-disuelto, orto-P, Fósforo total, Chl-a	Nueva campaña inicial.
M-1, M-2, M-3, M-4, M-5, M-6, M-7.	22-nov-2017 19-dic-2017 18-ene-2018	T, pH, Cond, OD, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , N-amoniacal, N-org, Nitrógeno total, P-disuelto, orto-P, Fósforo total	
B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6, B-7, B-8, B-9, B-10, B-11, B-12, B-13, B-14, B-15, B-16, B-17, B-19, B-20.	22-nov-2017 19-dic-2017 23-ene-2018	T, pH, Cond, OD	

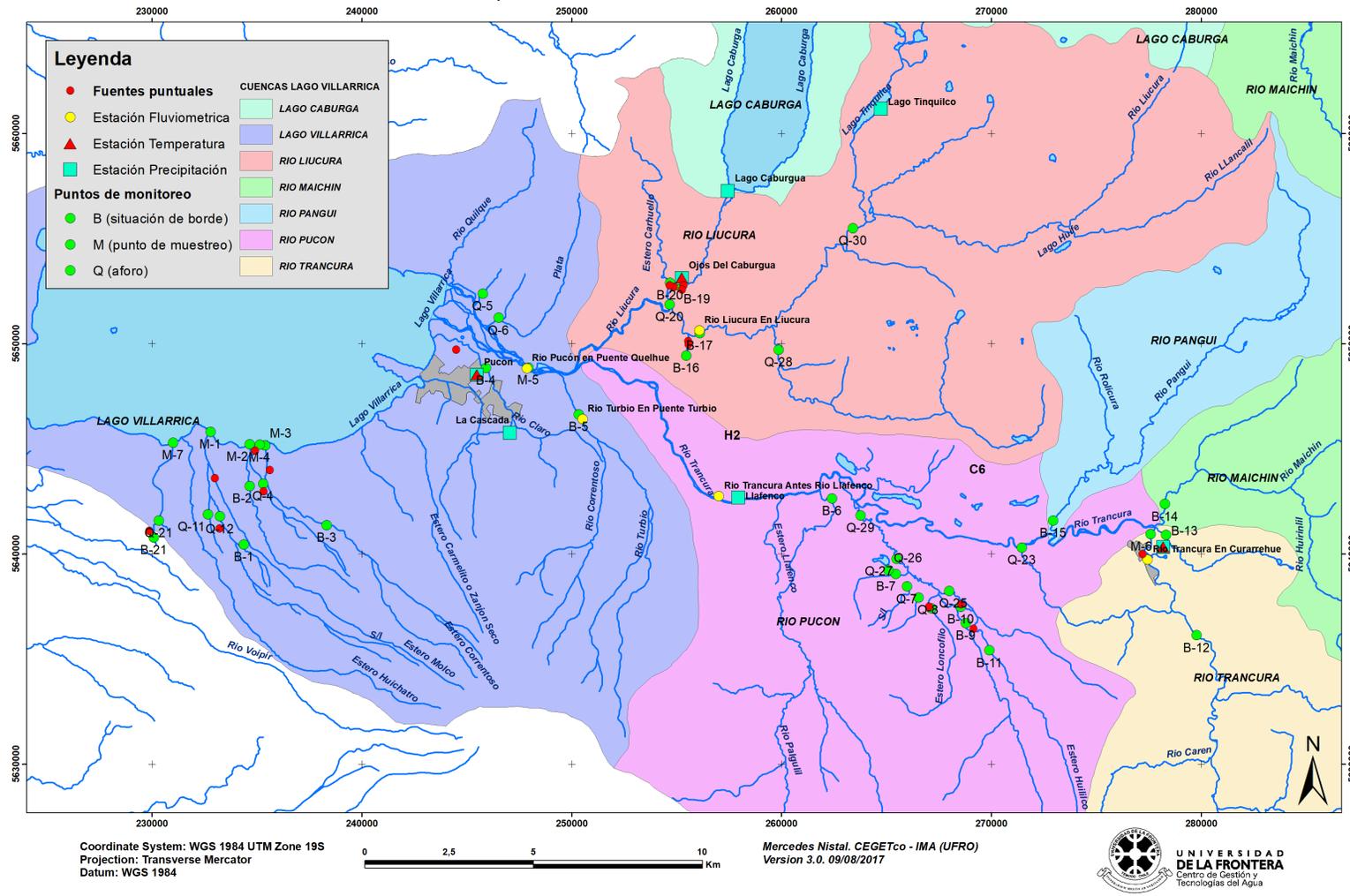


Figura 5. Identificación de fuentes puntuales, puntos de monitoreo y estaciones DGA





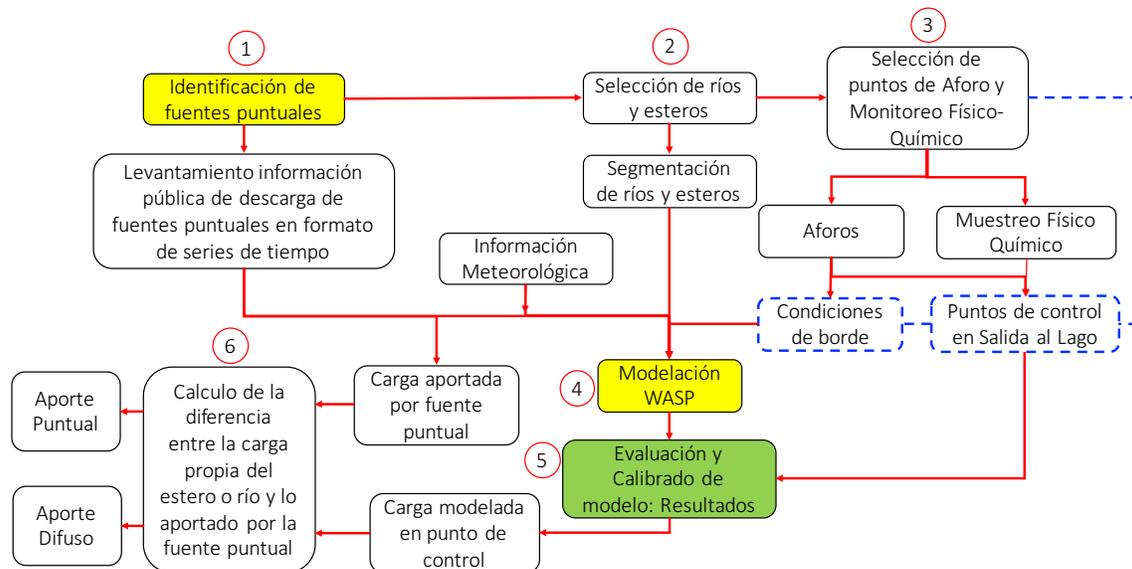
### 3.5 Estimación de la carga de nutrientes en afluentes al Lago Villarrica

Con la información recopilada, se desarrolló un modelo matemático para la estimación de contaminantes en los cauces tributarios al Lago Villarrica en el formato de series de tiempo. Para la construcción del modelo se utilizó el software EPA WASP Pro 7. Las simulaciones matemáticas corresponden al período de un año, desde el 1 febrero del 2017 hasta el 31 de enero de 2018. La Figura 7 muestra el procedimiento llevado a cabo para lograr la modelación y evaluación de resultados, el cual consiste en (1) la identificación de todas las fuentes puntuales dentro del área de estudio y levantamiento de toda información pública relevante, luego (2) se procede a la selección de todos los ríos, esteros y cada tributario (reciba descargas o no desde una fuente puntual) que signifiquen un aporte relevante de flujos de agua y masa. Una vez establecidos los ríos y esteros (3) se procede a la selección de los puntos de monitoreo de caudales y calidad que representen mejor el transporte y flujo en el tiempo. Posterior al levantamiento de información en terreno, de pisciculturas y segmentación de los ríos y esteros, (4) se procede a la modelación con el software EPA WASP. (5) Los resultados de la modelación son comparados con la toma de muestras realizadas en el tiempo en los puntos de control ubicados justo en la salida al lago, de esta forma, si los resultados del modelo muestran incoherencias, se procede a evaluar posibles errores en las bases de datos o errores de programación, una vez establecida la existencia de coherencia entre los valores modelados y los valores del muestreo realizado, (6) se procede al cálculo de la diferencia entre la carga de nutrientes aportada por la fuente puntual y lo calculado por WASP, la diferencia permite determinar la carga propia del río o estero independiente de lo aportado por las fuentes puntuales. Esta carga propia del cauce viene de los valores levantados del muestreo en los puntos identificados como condición de borde. Los puntos establecidos como condición de borde fueron definidos como aquellos puntos que se encuentran aproximadamente a 1 Km aguas arriba de cualquier fuente puntual en el río o estero, diferenciando, de esta manera, el aporte propio de la cuenca del aportado por las fuentes puntuales, ver Figura 8.

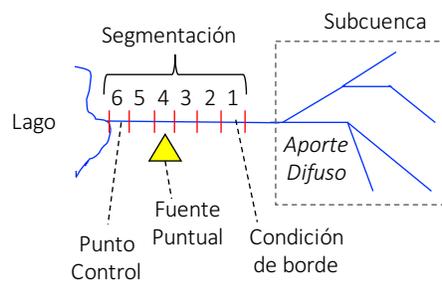
La carga de las pisciculturas fue calculada con datos tomados del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA). Condiciones de borde fueron establecidas con los muestreos realizados en terreno para todos aquellos puntos con clasificación "B" (ver Tabla 10, Figura 5 y Figura 6. Las dimensiones de las secciones transversales de los ríos y esteros fueron levantadas en terreno, para todos los puntos de muestreo y aforo. Los parámetros meteorológicos utilizados fueron tomados de la base de datos de la Dirección

Meteorológica de Chile. La división de tramos de modelación fue de aproximadamente 1 y 2 km de longitud cada uno. Finalmente, el modulo utilizado para el modelo de transporte EPA WASP Pro 7 fue el de eutrofización.

Respecto a la información de PTAS Pucón, esta fue obtenida a través de la Secretaría Regional Ministerial del Medioambiente de La Araucanía.



**Figura 7.** Esquema del proceso utilizado para modelar el transporte de nutrientes en ríos y esteros utilizando el software EPA WASP.



**Figura 8.** Esquema de segmentación y ubicación de puntos de monitoreo y control en la construcción de un modelo de transporte con WASP.

En las 4 campañas de muestreos se aforaron puntos claves necesarios para realizar la modelación de los ríos y esteros seleccionados para el presente estudio. Para el caso del Río Pucón o Minetúe, el caudal aforado en M-5 (Puente Quelhue) permitió obtener las series temporales en todos los cauces aportantes a ese punto. Utilizando la información de las campañas de monitoreo y aforo (26-sep, 22-nov, 19-dic y 23-ene) fue posible establecer una relación entre las alturas diarias en Puente Quelhue proporcionadas por la DGA entre marzo 2017 y enero 2018. Esto permitió realizar un balance de aporte controlado en M-5 (en %). Las series de tiempo de los caudales fueron construidas en base a la curva de descarga exponencial generada con las alturas mencionadas y los aforos realizados en las campañas de monitoreo. La curva de descarga generada fue la siguiente:

$$Q = 30,964 \times \text{EXP}(1,169 \times \text{alt}) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $Q$  es el caudal en  $\text{m}^3/\text{s}$  y  $\text{alt}$  es la altura en metros (m) de la estación fluviométrica de Río Pucón en Puente Quelhue (M-5).

Cabe mencionar que en el Estero Lefún, aunque se realizaron las tomas de muestras en M-7, Q-21 y B-21 (ver detalle en Tabla 9), no se modeló finalmente el mismo debido a que no fue posible obtener los datos de descarga de la piscicultura Alto Lefún (P15).

Respecto a la carga de las aguas servidas del municipio Curarrehue, se estimó por la diferencia entre lo medido entre B-12 (situación de borde) y el punto M-6 (aguas abajo del municipio).

Finalmente, para establecer una relación entre los valores de Nitrógeno y Fósforo total observados en el muestreo versus los valores modelados con WASP se procedió a un análisis de residuos a través del cálculo de errores a través de la función Raíz del Error Cuadrático Medio ( $U$ ), donde, para  $U$  cero (0) es el valor de máxima igualdad y uno (1) es el valor de máxima desigualdad, esto de acuerdo a la siguiente expresión:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (\hat{y} - y)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum \hat{y}^2 + \frac{1}{n} \sum y^2}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $U$  corresponde a la función Raíz del Error Cuadrático Medio,  $n$  corresponde al número de observaciones,  $\hat{y}$  es el valor modelado e  $y$  el valor observado.



### 3.6 Estimación de la carga proveniente desde fosas sépticas de la ribera sur

Respecto al cálculo de las emisiones de fuentes difusas en la ribera sur del lago, se procedió al levantamiento de información disponible en organismos públicos de La Araucanía, respecto a las autorizaciones sanitarias de sistemas particulares para el tratamiento o disposición de aguas negras en la ribera sur del Lago Villarrica. También se consultó la información disponible en los municipios de Villarrica y Pucón.

El levantamiento de información de los sistemas particulares se realizó bajo el supuesto de que todas las viviendas y/o edificaciones poseen un sistema para la disposición final de sus aguas negras (fosas sépticas). Por otro lado, se consultó a los presidentes de cada APR la cantidad de metros cúbicos que consume de manera mensual cada propiedad en el área definida como ribera sur, la cual se ha establecido como el espacio comprendido entre la playa y la ruta 199, esta definición se debe, principalmente, al establecimiento de un límite espacial que fuera sencillo de abarcar en la etapa de validación de la información en terreno, lo cual debía ajustarse a la logística y presupuesto de ejecución del proyecto en su momento.

Luego se georreferenció la ubicación de las viviendas en la ribera sur del Lago Villarrica, esto mediante un catastro (conteo) de viviendas a lo largo de la ribera sur del lago; utilizando imágenes satelitales y verificación en terreno, considerando como ribera el sector comprendido entre la playa y la ruta 199.

También se realizó una estimación del consumo de agua promedio a lo largo de un año para las viviendas que posean conexión a los sistemas de agua potable rural (APRs) y que se encuentren en la ribera sur del Lago Villarrica.

En el caso de las viviendas que no se encuentran conectadas a algún APR, se asumió que dichas viviendas poseen sistemas de pozos, noria o de almacenamiento de agua para consumo, y se realizó estimaciones de la tasa de consumo y evacuación promedio a lo largo de un año tipo en función de la información levantada desde las viviendas y/o edificaciones que sí poseen conexión a un APR.

Luego de la georreferenciación y la estimación de descarga de nutrientes desde las fosas sépticas, se aplicaron tres metodologías para la estimación de la carga de nutrientes provenientes de fosas sépticas, asumiendo que estas, en su conjunto, se comportan como una fuente difusa.



### 3.6.1 Metodología UACH

De acuerdo a lo explicado en la sección 3.2.10 Fuentes Difusas, se aplicó la ecuación 1

### 3.6.2 Ley de Fick

Uno de los supuestos implícitos en el cálculo de emisiones de la metodología propuesta por UACH (2009) es que las emisiones son aportadas de forma directa al Lago Villarrica. De esta forma el transporte se asumiría con un comportamiento del tipo advectivo. Tal supuesto no considera el transporte difusivo ni dispersivo de los nutrientes en el suelo.

El transporte de nutrientes se ve afectado por ciertas características del suelo, tales como el gradiente hidráulico, porosidad, tortuosidad entre otros. Además, las especies de contaminantes contenidas en las aguas residuales poseen características de transporte propias, como la difusividad en agua y suelo, retardos por reacción con elementos propios del suelo o conversión química de una especie a otra. Estas características, en su conjunto, disminuyen el tiempo de transporte desde la fuente emisora hasta el cuerpo de agua receptor.

La difusión es un proceso mediante el cual una sustancia disuelta se mueve por un gradiente de concentraciones. En un líquido, el flujo de masa por difusión está regido por la primera ley de Fick (Román, 1998):

$$F = -D_m \frac{dC}{dx} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde F es el flujo de masa por unidad de tiempo y unidad de sección perpendicular al flujo ( $\text{m}^3/\text{m}^2\text{día}$ ),  $D_m$  es el coeficiente de difusión ( $\text{m}^2/\text{día}$ ), C es la concentración ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) y x la distancia entre dos puntos a evaluar (m).

Respecto a la aplicación de la primera ley de Fick para un medio poroso, Román (1998) plantea que el único cambio corresponde al coeficiente de difusión efectiva  $D^*$ , el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$D^* = D_m * m_e^c \quad \text{Ec. 5}$$



Donde  $m_e$  corresponde a la porosidad efectiva del medio y  $c$  a un coeficiente (1,8 a 2,0 para materiales consolidados; 1,3 para arenas no consolidadas). De esta forma la Ec. 2 quedaría de la siguiente forma:

$$F = -D^* \frac{dC}{dx} \quad \text{Ec. 6}$$

Cuando es necesario considerar el efecto del tiempo en el la concentración a una distancia determinada, es necesario recurrir a la segunda ley de Fick, donde una solución es la siguiente (Román, 1998):

$$C(x, t) = C_0 * \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{D^* * t}} \right) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde  $C_0$  corresponde a la concentración inicial del contaminante, que permanece constante en el tiempo,  $C(x,t)$  es la concentración a una distancia  $x$  transcurrido un tiempo  $t$  y  $\operatorname{erfc}()$  es la función error complementario.

Al evaluar este tipo de solución, es posible constatar que el proceso difusivo es extremadamente lento, para la cual es necesario realizar evaluación a largo plazo (años) para observar un transporte considerable, lo cual también dependerá del grado de porosidad del terreno.

Otro aspecto a considerar en el transporte en medios porosos es la dispersión mecánica, la cual consiste en el movimiento del fluido por el medio poroso, la cual se produce en el sentido del flujo (longitudinal y transversal). Donde la dispersión longitudinal siempre es mayor a la transversal. La capacidad del medio poroso para dispersar mecánicamente un fluido que circula por él es representado por un coeficiente denominado dispersividad dinámica ( $\alpha$ ), en el que influyen la porosidad, la tortuosidad, la forma de los granos, entre otros (Román, 1998).

Se han elaborado diversas relaciones entre la dispersividad dinámica longitudinal ( $\alpha_L$ ) y la longitud recorrida ( $x$ ) por el flujo que ha provocado la dispersión, Román (1998) plantea la posibilidad de obtener este parámetro a partir de una correlación de datos empíricos que no consideran las características del medio mediante la siguiente relación:

$$\alpha_L = 0,83[\log(x)]^{2,414} \quad \text{Ec. 8}$$

De esta forma, es posible calcular la acción conjunta de la difusión y la dispersión mecánica mediante un nuevo factor denominado dispersión hidrodinámica ( $D_L$ ).

$$D_L = \alpha_L \frac{g_h K}{m_e} + D^* \quad \text{Ec. 9}$$

Donde  $K$  es la conductividad hidráulica,  $g_h$  el gradiente hidráulico y  $m_e$  la porosidad eficaz.

Así, la concentración a una distancia  $x$  transcurrido un tiempo  $t$  puede calcularse de la siguiente manera.

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} * \operatorname{erfc} \left( \frac{x - \frac{g_h K}{m_e}}{2\sqrt{D_L * t}} \right) \quad \text{Ec. 10}$$

La ecuación 9 será aplicada en la estimación del transporte de nutrientes provenientes de las fosas sépticas ubicadas en la ribera sur del Lago Villarrica.

### 3.7 Otras posibles fuentes

Por otro lado, como una evaluación extra se consideró el posible aporte de Fósforo o Nitrógeno al lago por parte del Volcán Villarrica. Para ello, se recurrió a informes del SERNAGEOMIN y a algunos estudios científicos relacionados al volcán para la estimación de aportes de minerales y otros compuestos derivados de los procesos geoquímicos propios del volcán a cauces tributarios al Lago Villarrica y que provengan de deshielos de la nieve acumulada por el volcán.

### 3.8 Criterios para medidas de mitigación

Finalmente, se procedió a establecer algunas propuestas de medidas de mitigación en base a análisis de literatura nacional e internacional referidas a la implementación de medidas para la reducción de nutrientes hacia cuerpos de agua lacustres, según fuentes de emisión. Para luego elaborar un listado priorizado de medidas de mitigación.



## 4. RESULTADOS

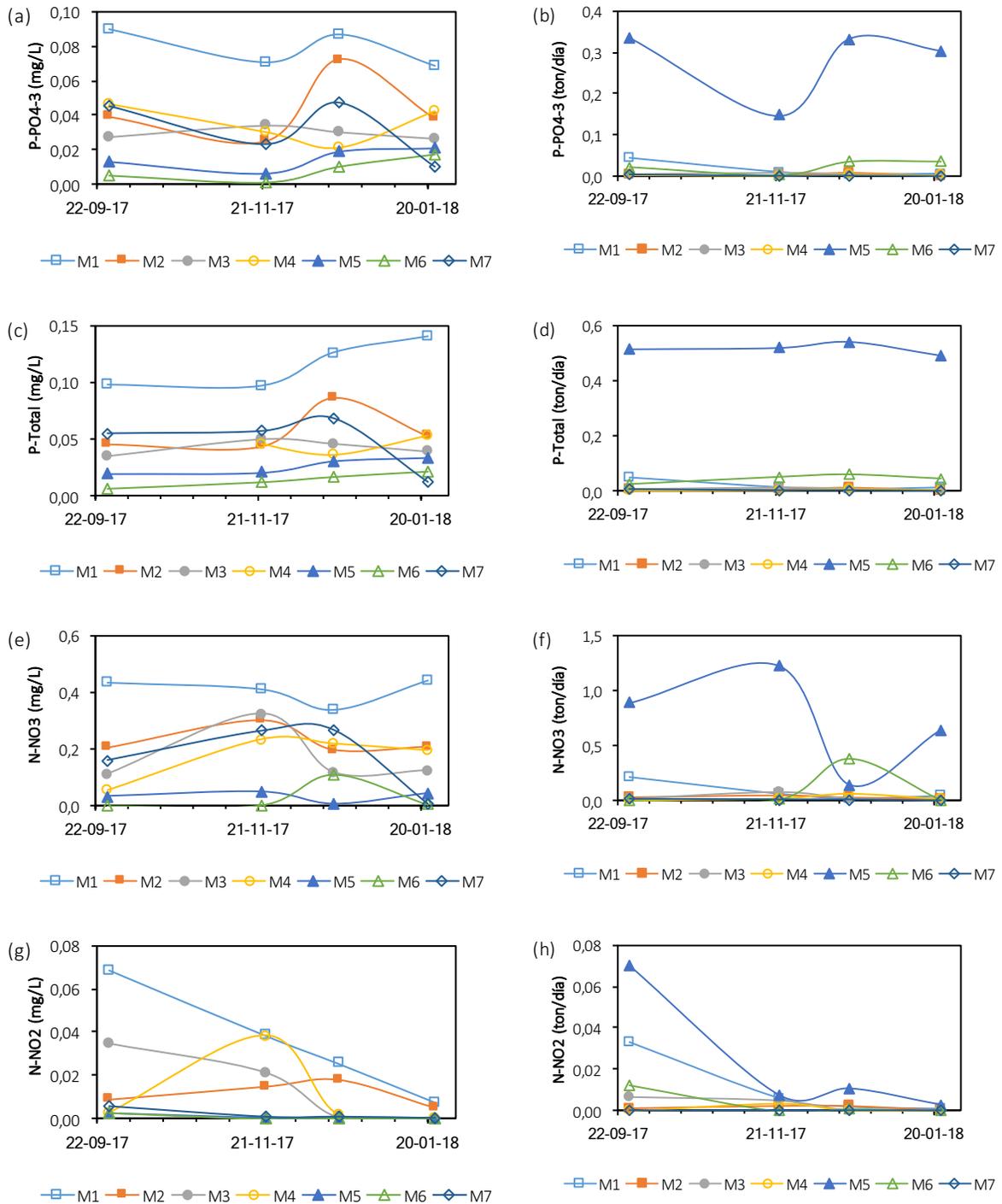
### 4.1 Muestreo y determinación de nutrientes

El muestreo se realizó en 28 puntos diferentes de la cuenca, 20 muestras fueron recolectadas en situaciones de borde (Tipo “B”), entendiéndose como borde aproximadamente 1 km aguas arriba desde un punto de descarga de alguna fuente puntual (pisciculturas). También se consideró 6 puntos que descargan de forma directa al Lago Villarrica (Tipo “M”) y uno aguas abajo de los 7 emisarios de Curarrehue (M-6).

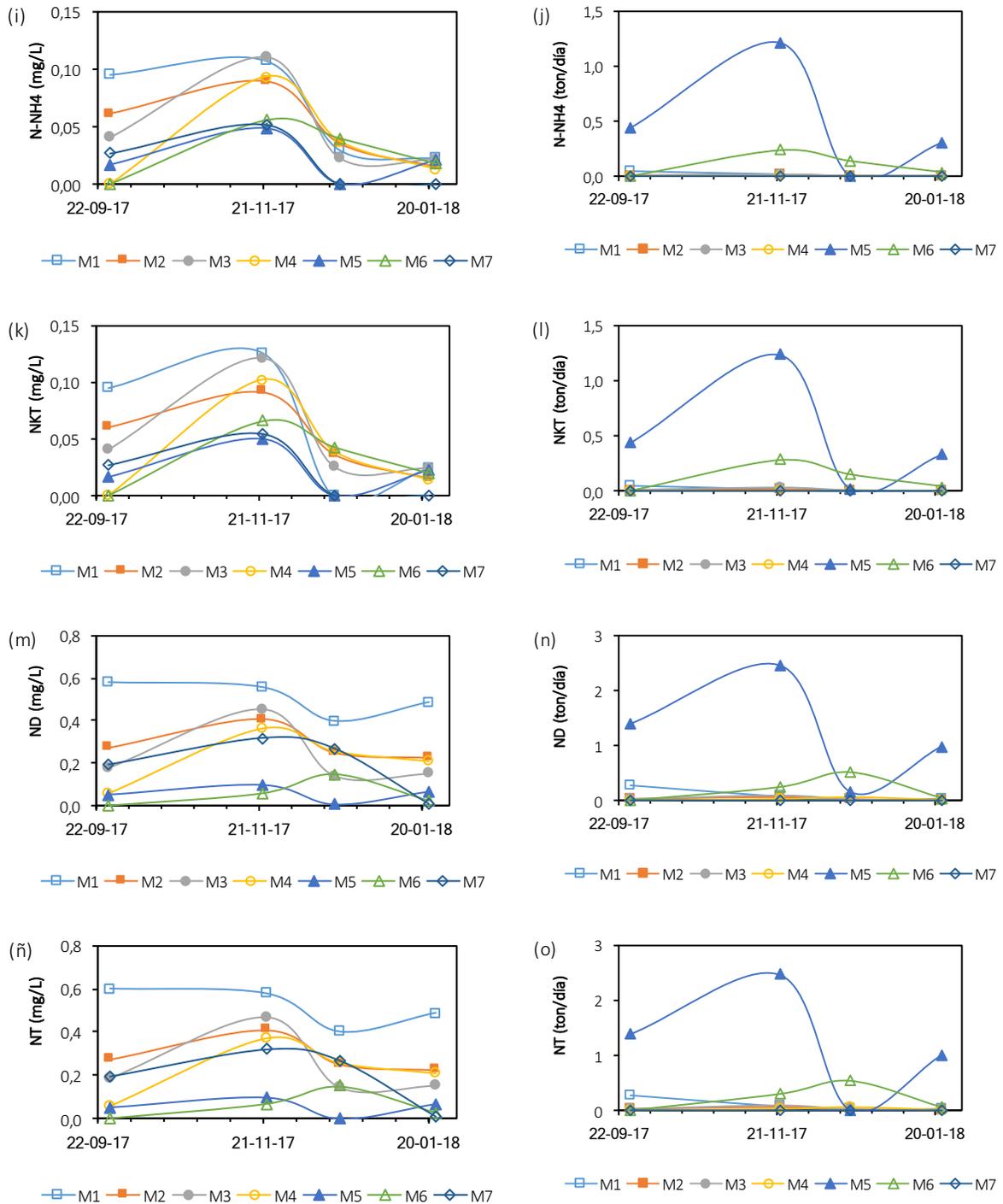
Por otro lado, originalmente sólo eran 6 puntos tipo “M”, en terreno se encontró un nuevo punto que debía ser considerado como “M” (estero Los Chilcos), y también fue considerado inconsistente muestrear en punto originalmente denominado B-18 (ubicado en el Cristo camino a Caburgua) por ser aguas estancadas y en algunos momentos, flujo y/o acumulación de aguas lluvia. Debido a esto se creó la nueva categoría M-4 (desembocadura del estero Los Chilcos al Lago Villarrica) y se eliminó B-18. La información levantada en terreno y de los análisis de laboratorio se pueden observar en la Tabla 10.

La Figura 9 presenta un resumen de los muestreos realizados en los puntos M (desembocaduras al lago), tanto en valores de concentración como en carga. Respecto a los valores de Fósforo inorgánico y total, es posible observar que los valores se mantienen estables bajo el rango de los 0,1 mg/L. En el caso de  $P-PO_4^{3-}$  (Figura 9a) M1 muestra una mayor concentración que el resto de los esteros, pero esto se debe al bajo caudal que M1 presenta en comparación a los demás esteros.- En este caso M5, que corresponde al Río Trancura, muestra una concentración menor, pero al considerar el efecto del caudal del cauce, la participación cambia, siendo el Río Trancura el que mayor  $P-PO_4^{3-}$  aporta al lago (ver Figura 9b). Esta interpretación es válida de aplicar al resto de parámetros presentados en la Figura 9.

Respecto a los valores de Nitrógeno, en general, todos los valores se muestran estables y similares entre todos los esteros muestreados.  $N-NH_4$  y NTK muestran un decaimiento importante a partir del mes de diciembre, esto se debe al aumento de la temperatura del agua en estas fechas, lo cual aumenta el proceso de nitrificación.



**Figura 9.** Muestreo en los puntos M para: (a) P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, (b) Fósforo total, (c) N-NO<sub>3</sub>, (d) N-NO<sub>2</sub>, (e) N-NH<sub>4</sub>, (f) NKT, N-Disuelto y (h) Nitrogeno total.



Continuación de Figura 9. Muestreo en los puntos M para: (a) P-PO4-3, (b) Fósforo total, (c) N-NO3, (d) N-NO2, (e) N-NH4, (f) NKT, N-Disuelto y (h) Nitrógeno total.

Tabla 10. Parámetros físico-químicos.

Punto	Fecha	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	T (°C)	pH	Cond. (μS/cm)	DO (ppm)	Fósforo Disuelto [P-PO4-3] (mg/L)	Fósforo Total. [PT] (mg/L)	Nitrato [NO3] (mg/L)	Nitrito [NO2] (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal [N-NH3] (mg/L)	Nitrógeno Total Kjeldahl [NKT] (mg/L)	Nitrógeno Disuelto [ND] (mg/L)	Nitrógeno Total [NT] (mg/L)
M-1	26-09-17	5,62	8,54	7,5	89	9,81	0,09	0,098	1,926	0,226	0,095	0,095	0,581	0,599
	22-11-17	1,82	10,48	7,55	105	8,47	0,071	0,097	1,825	0,127	0,107	0,126	0,558	0,577
	19-12-17	0,82	10,51	7,41	70	10,29	0,087	0,126	1,508	0,084	0,03	0,034	0,396	0,4
	23-01-18	1,18	9,56	7,33	79	10,10	0,069	0,1400	1,960	0,067	0,023	0,025	0,486	0,487
M-2	26-09-17	1,84	9,39	7,54	102	9,48	0,039	0,046	0,907	0,03	0,061	0,061	0,273	0,275
	22-11-17	2,07	10,97	7,58	103	8,41	0,025	0,044	1,343	0,049	0,089	0,092	0,407	0,41
	19-12-17	1,70	10,47	7,21	146	10,65	0,072	0,086	0,873	0,059	0,035	0,037	0,250	0,252
	23-01-18	0,85	10,15	7,45	70	9,34	0,038	0,0530	0,923	0,007	0,015	0,016	0,226	0,226
M-3	26-09-17	2,26	8,89	7,53	84	9,71	0,027	0,035	0,5	0,113	0,041	0,041	0,179	0,188
	22-11-17	2,70	11,23	7,49	96	8,34	0,034	0,05	1,432	0,07	0,111	0,121	0,456	0,466
	19-12-17	2,26	8,74	7,24	105	11,1	0,03	0,046	0,524	0,003	0,023	0,026	0,142	0,145
	23-01-18	0,68	11,34	7,53	56	9,69	0,026	0,0390	0,555	0,015	0,022	0,025	0,152	0,154
M-4	26-09-17	1,10	7,94	7,52	328	10	0,046	0,35	0,254	0,009	<0,009	<0,001	0,059	0,06
	22-11-17	1,06	8,66	7,47	85	9,2	0,03	0,046	1,033	0,126	0,093	0,102	0,365	0,374
	19-12-17	3,25	12,07	7,4	57	9,85	0,021	0,037	0,968	0,005	0,037	0,039	0,257	0,259
	23-01-18	0,98	8,38	7,29	67	10,54	0,042	0,0530	0,866	0,009	0,013	0,014	0,211	0,212
M-5	26-09-17	296,57	8,77	7,23	83	9,6	0,013	0,02	0,153	0,009	0,017	0,017	0,054	0,054
	22-11-17	285,16	11,44	7,57	75	8,48	0,006	0,021	0,22	0,001	0,049	0,05	0,099	0,10
	19-12-17	201,40	12,19	7,39	57	10,54	0,019	0,031	0,037	0,002	<0,009	0,001	0,009	<0,010
	23-01-18	166,60	13,03	7,52	64	4,43	0,021	0,0340	0,198	0,008	0,021	0,023	0,068	0,070
M-6	26-09-17	53,53	7,65	7,16	46	3,6	0,005	0,006	<0,003	0,009	<0,009	<0,001	0,002	<0,010
	22-11-17	50,14	8,09	7,04	26	11,89	0,001	0,012	0,014	<0,001	0,056	0,066	0,059	0,069
	19-12-17	41,13	11,57	6,21	443	10,6	0,01	0,017	0,483	0,001	0,04	0,043	0,149	0,152
	23-01-18	24,42	15,16	7,34	59	5,88	0,017	0,0220	0,023	0,006	0,018	0,020	0,025	0,027
M-7	26-09-17	1,17	10	7,61	94	9,25	0,045	0,055	0,715	0,02	0,027	0,027	0,193	0,195
	22-11-17	0,46	12,26	7,59	94	8,15	0,023	0,057	1,168	0,003	0,052	0,055	0,317	0,320
	19-12-17	0,43	11,89	7,51	72	10,24	0,047	0,068	1,182	0,003	<0,009	<0,001	0,2679	0,268
	23-01-18	0,35	11,03	7,61	73	9,98	0,01	0,013	0,037	0,007	<0,009	<0,001	0,01	0,01

Tabla 10. Parámetros físico-químicos. (Continuación 1)

Punto	Fecha	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	T (°C)	pH	Cond. (μS/cm)	DO (ppm)	Fósforo Disuelto [P-PO4-3] (mg/L)	Fósforo Total. [PT] (mg/L)	Nitrato [NO3] (mg/L)	Nitrito [NO2] (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal [N-NH3] (mg/L)	Nitrógeno Total Kjeldahl [NKT] (mg/L)	Nitrógeno Disuelto [ND] (mg/L)	Nitrógeno Total [NT] (mg/L)
B-1	26-09-17	0,28	8,33	7,1	82	9,75	0,01	0,013	0,037	0,007	<0,009	<0,001	0,01	0,01
	22-11-17	0,19	10,26	7,47	79	7,85	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	0,14	13,03	7,45	64	8,96	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,08	13,42	7,38	60	8,08	-	-	-	-	-	-	-	-
B-2	26-09-17	1,77	9,2	7,54	91	9,62	0,023	0,027	0,593	0,02	0,014	0,014	0,152	0,154
	22-11-17	1,49	10,68	7,62	92	8,48	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	1,00	11,34	7,62	9,86	66	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,12	14,77	7,35	53	7,75	-	-	-	-	-	-	-	-
B-3	26-09-17	0,35	8,34	7,39	80	9,69	0,018	0,024	0,023	0,007	0,011	0,011	0,018	0,018
	22-11-17	0,30	9,52	7	77	8,3	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	0,29	12,97	7,31	55	9,26	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,42	11,54	8,08	64	8,68	-	-	-	-	-	-	-	-
B-4	26-09-17	1,45	9,49	7,24	78	9,46	0,012	0,017	0,241	0,009	<0,009	<0,001	0,056	0,057
	22-11-17	2,03	11,08	7,17	38	11,53	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	1,67	13,81	7,78	57,5	8,84	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,67	13,91	7,85	56	9,15	-	-	-	-	-	-	-	-
B-5	26-09-17	10,79	7,25	7,31	49	10,03	0,006	0,008	0,008	0,008	<0,009	<0,001	0,004	<0,010
	22-11-17	7,48	14,08	7,36	47	7,33	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	4,01	9,98	6,9	27	10,47	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,74	10,04	6,97	30	9,95	-	-	-	-	-	-	-	-
B-6	26-09-17	35,37	6,6	7,72	34	6,16	0,023	0,032	0,071	0,011	<0,009	<0,001	0,019	0,019
	22-11-17	50,54	9,54	7,32	33	11,91	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	37,25	7,9	6,46	50	14,31	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	26,23	10,16	10,35	52,6	8,87	-	-	-	-	-	-	-	-
B-7	26-09-17	0,51	8,67	7,68	40	5,52	0,001	0,005	0,134	0,007	<0,009	<0,001	0,032	0,032
	22-11-17	0,41	11,05	7,44	42	10,92	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	0,12	13,32	8,06	61	6,46	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,20	14,49	10,38	65,3	6,91	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 10. Parámetros físico-químicos. (Continuación 2)

Punto	Fecha	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	T (°C)	pH	Cond. (μS/cm)	DO (ppm)	Fósforo Disuelto [P-PO4-3] (mg/L)	Fósforo Total. [PT] (mg/L)	Nitrato [NO3] (mg/L)	Nitrito [NO2] (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal [N-NH3] (mg/L)	Nitrógeno Total Kjeldahl [NKT] (mg/L)	Nitrógeno Disuelto [ND] (mg/L)	Nitrógeno Total [NT] (mg/L)
B-8	26-09-17	3,80	6,85	7,54	34	5,73	0,001	0,003	0,039	0,007	<0,009	<0,001	0,01	0,011
	22-11-17	3,48	9,49	7,56	35	11,44	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	1,04	12,28	7,79	58,6	6,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	1,41	15,11	10,76	65,8	7,07	-	-	-	-	-	-	-	-
B-9	26-09-17	2,84	7,13	7,64	49	5,43	0,006	0,013	0,02	0,007	<0,009	<0,001	0,006	<0,010
	22-11-17	6,09	10,84	7,25	46	11,01	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	3,82	9,34	7,57	71,5	7,44	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	3,88	10,70	8,72	94	7,30	-	-	-	-	-	-	-	-
B-10	26-09-17	12,04	8,16	7,41	55	5,61	0,041	0,042	0,005	0,009	<0,009	0,005	0,003	<0,010
	22-11-17	13,94	8,89	6,92	49	11,32	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	5,06	9,17	7,33	69,8	6,77	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	8,50	9,10	8,26	74,5	8,35	-	-	-	-	-	-	-	-
B-11	26-09-17	0,05	7,25	7,8	35	5,19	0,023	0,031	0,01	0,011	<0,009	<0,001	0,005	<0,010
	22-11-17	1,99	12,2	7,06	29	10,68	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	1,47	9,88	7,74	26,9	6,95	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,91	11,36	9,16	24,4	7,71	-	-	-	-	-	-	-	-
B-12	26-09-17	31,36	6,95	7,05	42	3,86	0,007	0,014	0,098	0,007	<0,009	0,005	0,024	0,029
	22-11-17	38,78	7,19	6,91	24	12,06	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	22,55	10,72	5,66	37,8	15,65	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	6,47	13,80	6,98	53,2	6,30	-	-	-	-	-	-	-	-
B-13	26-09-17	1,30	8,37	7,47	31	4,33	0,003	0,003	0,003	0,007	<0,009	<0,001	0,002	<0,010
	22-11-17	0,77	10,5	7,017	35	10,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	0,30	9,72	6,25	53,5	12,59	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,49	11,08	7,42	53,7	7,08	-	-	-	-	-	-	-	-
B-14	26-09-17	44,71	7,7	7,68	32	4,83	0,003	0,003	0,022	0,007	<0,009	<0,001	0,007	<0,010
	22-11-17	58,31	8,41	7,2	27	12,37	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	36,61	11,49	6,71	45,5	10,61	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	22,59	15,02	8,23	51,7	7,02	-	-	-	-	-	-	-	-

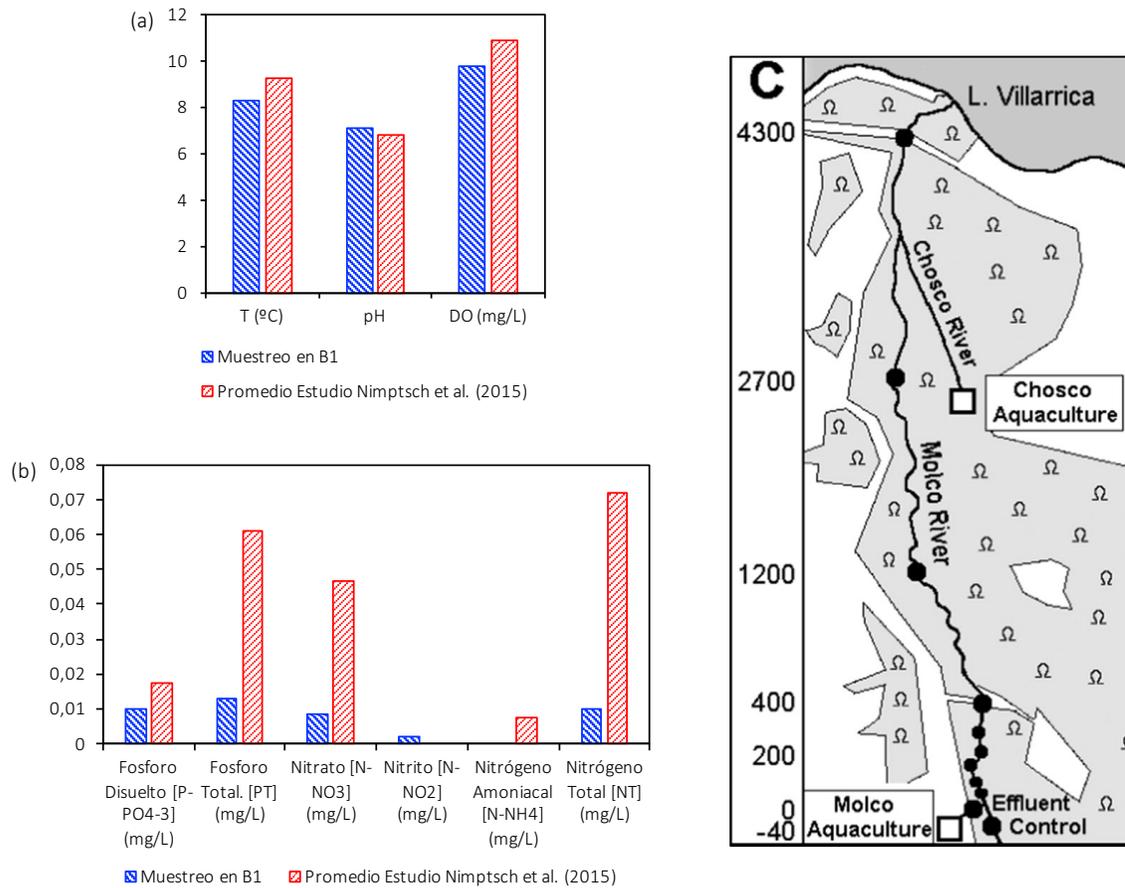
Tabla 10. Parámetros físico-químicos. (Continuación 3)

Punto	Fecha	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	T (°C)	pH	Cond. (μS/cm)	DO (ppm)	Fósforo Disuelto [P-PO4-3] (mg/L)	Fósforo Total. [PT] (mg/L)	Nitrato [NO3] (mg/L)	Nitrito [NO2] (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal [N-NH3] (mg/L)	Nitrógeno Total Kjeldahl [NKT] (mg/L)	Nitrógeno Disuelto [ND] (mg/L)	Nitrógeno Total [NT] (mg/L)
B-15	26-09-17	25,35	7,06	7,69	27	5,1	0,002	0,006	0,098	0,007	<0,009	<0,001	0,024	0,024
	22-11-17	17,99	8,8	7,1	33	14,32	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	10,14	10,39	6,39	52,6	11,59	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	7,61	12,86	9,07	55,6	7,17	-	-	-	-	-	-	-	-
B-16	26-09-17	3,56	7,57	7	101	9,87	0,045	0,047	0,764	0,008	<0,009	<0,001	0,174	0,175
	22-11-17	0,62	7,61	7,09	102	8,71	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	2,43	7,61	6,75	72	10,77	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,36	7,68	6,80	62	10,33	-	-	-	-	-	-	-	-
B-17	26-09-17	61,90	8,49	7,25	64	9,69	0,007	0,014	0,4	0,011	<0,009	<0,001	0,093	0,094
	22-11-17	54,25	9,9	7,43	76	8,59	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	34,01	12,03	7,88	90,6	7,35	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	33,75	10,75	7,50	102,3	5,88	-	-	-	-	-	-	-	-
B-19	26-09-17	0,05	9,92	7,2	78	7,8	0,016	0,021	0,584	0,009	<0,009	<0,001	0,134	0,135
	22-11-17	0,09	9,99	7,25	75	6,67	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	0,08	10	7,02	52	8,47	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,07	10,01	6,91	49	7,81	-	-	-	-	-	-	-	-
B-20	26-09-17	8,93	8,96	7,67	59	9,74	0,013	0,018	0,095	0,007	<0,009	<0,001	0,023	0,024
	22-11-17	2,08	9,69	7,71	64	7,88	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	2,95	9,93	7,37	47	9,42	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	2,91	10,18	7,55	46	8,86	-	-	-	-	-	-	-	-
B-21	26-09-17	0,03	9,93	7,22	104	9,31	0,053	0,058	1,806	0,007	<0,009	<0,001	0,41	0,41
	22-11-17	0,04	10,21	7,18	104	7,94	-	-	-	-	-	-	-	-
	19-12-17	0,03	10,74	7,27	80	9,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	23-01-18	0,01	10,82	7,22	82	8,84	-	-	-	-	-	-	-	-



#### 4.1.1 Comparación de resultados de muestreo con estudios anteriores.

Un estudio realizado por Nimptsch et al. (2015) sobre el transporte de nutrientes emitidos por pisciculturas sobre el estero Molco Villarrica, presenta mediciones de parámetros físico-químicos entre los meses octubre 2013 a junio 2014. Estas mediciones fueron realizadas 40 metros aguas arriba de la restitución de la piscicultura Cheuilco ubicada en el estero Molco (ver Figura 10 C). La comparación entre las mediciones realizadas por Nimptsch et al. (2015) y la condición de borde B1 para el mismo estero muestran valores similares para temperatura, pH y concentración de oxígeno disuelto (Figura 10a). Respecto a los valores de Fósforo y Nitrógeno, el estudio de Nimptsch et al. (2015) muestra mayores concentraciones que los presentados en este estudio, esto puede deberse a que los muestreos realizados en el estudio de Nimptsch et al. (2015) fueron desde el 15 de octubre 2013 a 26 de junio de 2014 (7 muestras en total), en cambio el presente estudio solo cuenta con un muestreo entre el periodo de tiempo comprendido desde octubre a junio (concretamente el 26 de septiembre de 2017). Para realizar una comparación más exhaustiva es necesario realizar una mayor toma de muestras en la condición de borde B1 espaciada en el tiempo.



**Figura 10.** Comparación de muestreos realizados en estero Molco. (a) parámetros temperatura, pH y Oxígeno disuelto aguas arriba de Piscicultura Cheuilco en estero Molco. (b) Parámetros químicos y (c) mapa de puntos de muestreo en el estudio de Nimptsch et al. (2015).

## 4.2 Transporte de nutrientes en cauces aportantes

El resumen de los resultados del modelo de transporte calculados con el software EPA-WASP7 para cada uno de los esteros y ríos considerados en este estudio se presentan en la Tabla 11. En total al Lago Villarrica llegan 128,5 ton/año de Fósforo y 1126,8 ton/año de Nitrógeno desde los cauces tributarios de la ribera sur y río Trancura. De los cuales, las Pisciculturas, Aguas Servidas de Curarrehue y la PTAS de Pucón aportan el 44,5% de Fósforo total y el 73,2% de Nitrógeno total, la diferencia puede ser atribuida fuentes del tipo difusas.

La Figura 11 presenta un resumen gráfico de la distribución de Nitrógeno y Fósforo total en cada uno de los ríos y esteros evaluados, en la cual es posible observar zonas de mayor saturación, entre las cuales, el Río Trancura es el que transporta la mayor carga de Nitrógeno y Fósforo total hacia el Lago Villarrica. En el caso de Nitrógeno total, este provendría principalmente desde el Río Liucura, y en el caso del Fósforo total, este sería aportado principalmente por el Río Trancura debido a que este es aportado principalmente por fuentes difusas y la cuenca del Río Trancura es mayor que la del Río Liucura, lo cual influenciaría en la cantidad de Fósforo aportado.

Respecto al ajuste de los modelos de transporte desarrollados, la Tabla 11 presenta los valores de la función Raíz del Error Cuadrático Medio (U), donde 0 es la máxima igualdad y 1 la máxima desigualdad entre los valores observados en los muestreos y los valores modelados para la misma fecha y lugar. De ello es posible notar que los modelos presentan un desempeño aceptable, salvo para el Nitrógeno total en Estero los Chilcos, lo cual se debe a un problema en la claridad de la información de descargas informadas por la empresa establecida en este estero, lo cual se discute más adelante en el apartado correspondiente a Estero Los Chilcos.

**Tabla 11.** Estimación de aporte de Nitrógeno y Fósforo desde esteros y ríos aportantes al Lago Villarrica.

Nombre del estero	TOTAL, río/estero				Pisciculturas/AS/PTAS		Fuentes Difusas	
	Fósforo total (ton/año)	Error* $U_p$	Nitrógeno total (ton/año)	Error* $U_N$	Fósforo total (ton/año)	Nitrógeno total (ton/año)	Fósforo total (ton/año)	Nitrógeno total (ton/año)
M1 Estero Molco	5,8	0,127	62,4	0,386	4,3	61,9	1,5	0,5
M2 Estero Loncotraro	3,3	0,143	22,7	0,027	1,4	10,4	1,9	12,3
M3 Estero Correntoso	2,8	0,217	19,6	0,091	1,6	19,0	1,2	0,6
M4 Estero Los Chilcos	8,1	0,205	87,9	0,837	6,9	84,3	1,2	3,6
M5 Río Trancura (Pucón) T.118+T.112	108,5	0,398	934,2	0,246	43,0	649,5	65,5	284,7
TOTAL (ton/año)	128,5		1126,8		57,2	825,1	71,3	301,7
Aporte (%)	100%		100%		44,5%	73,2%	55,5%	26,8%

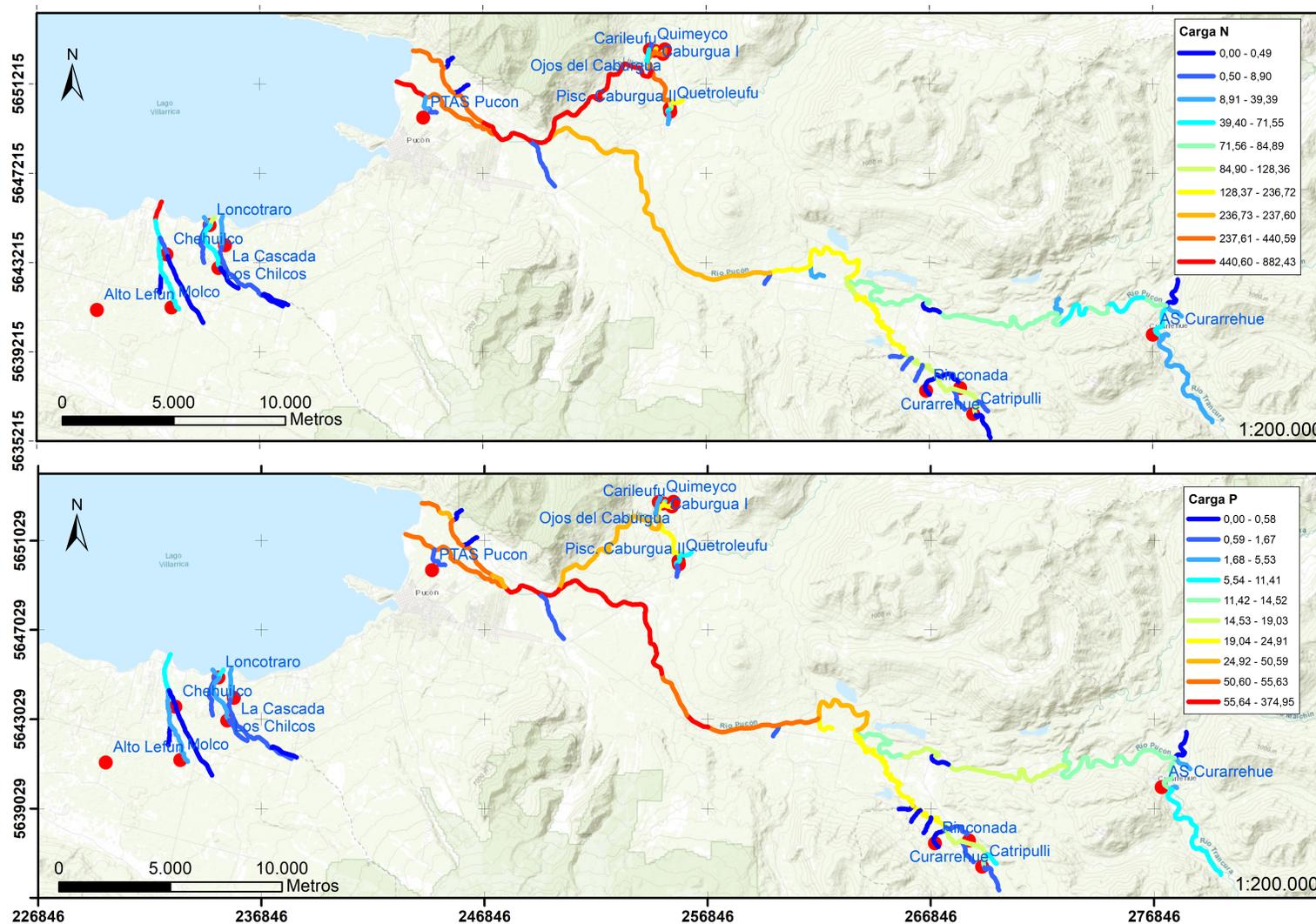


Figura 11. Resumen de cargas general en ton/año para todos los tramos de modelación considerados para el estudio.

A continuación, se presenta de forma detallada la validación de cada uno de los modelos de transporte desarrollados.

#### 4.2.1 Estero Molco (M1)

El estero Molco presenta descargas provenientes de dos pisciculturas, Piscicultura Chehuilco ubicada en el estero Molco y Piscicultura Molco ubicada en el estero Chehuilco. La Figura 12 presenta un resumen esquemático de la ubicación de las Pisciculturas y la división de los tramos en los esteros. La Tabla 12 presenta la geometría utilizada para el desarrollo del modelo de transporte sobre el estero Molco, donde la salida al lago corresponde al tramo 10 (T.10). La Piscicultura Chehuilco se encuentra ubicada en el tramo T.4 y la piscicultura Molco en el tramo T.5. La carga de las fuentes puntuales se determinó y utilizó según lo planteado en la metodología, sección 3.5.

La validación del modelo de transporte se observa en la Figura 13a-b para Fósforo y Nitrógeno total con un  $U_P$  y  $U_N$  de 0,127 y 0,386 respectivamente. Al realizar un análisis comparativo del flujo másico por cada elemento entre el tramo T.10 (salida al lago) y los tramos con descargas de pisciculturas (Figura 13c-d), es posible notar que el mayor aporte de Nitrógeno y fósforo total provienen del tramo T.5. Un análisis de correlación confirma esta relación lineal entre el flujo másico en T.10 y T.5 (ver Figura 14).

**Tabla 12.** Geometría utilizada para modelo de estero Molco.

Nombre del segmento	Largo (m)	Ancho (m)	Área Superficial (m <sup>2</sup> )	Profundidad promedio (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo Residencia (día)	Velocidad (m/día)	Pendiente (m/m)
T.1 Est. Molco	1567,92	3,20	5017,34	0,30	1505,20	0,04	0,50	0,0382670
T.2 Est. Molco	1260,60	3,35	4223,01	0,81	3420,64	0,08	0,18	0,0317308
T.3 Est. Molco	601,82	3,43	2061,23	1,07	2195,21	0,05	0,13	0,0332324
T.4 Est. Molco	905,73	3,46	3136,09	1,19	3739,79	0,09	0,12	0,0220816
T.5 Est. Chehuilco	1952,55	7,00	13667,85	0,35	4783,75	0,02	1,35	0,0256075
T.6 Est. sin nombre	925,95	0,90	833,36	0,25	208,34	0,01	1,15	0,0215993
T.7 Est. Chehuilco	766,63	7,00	5366,39	0,35	1878,24	0,01	1,35	0,0261007
T.8 Est. Chehuilco	863,09	7,00	6041,62	0,35	2114,57	0,01	1,35	0,0231837
T.9 Est. Molco	818,12	3,35	2740,72	0,81	2219,98	0,05	0,18	0,0244578
T.10 Est. Molco	901,31	3,50	3154,59	1,32	4164,05	0,10	0,10	0,0443799

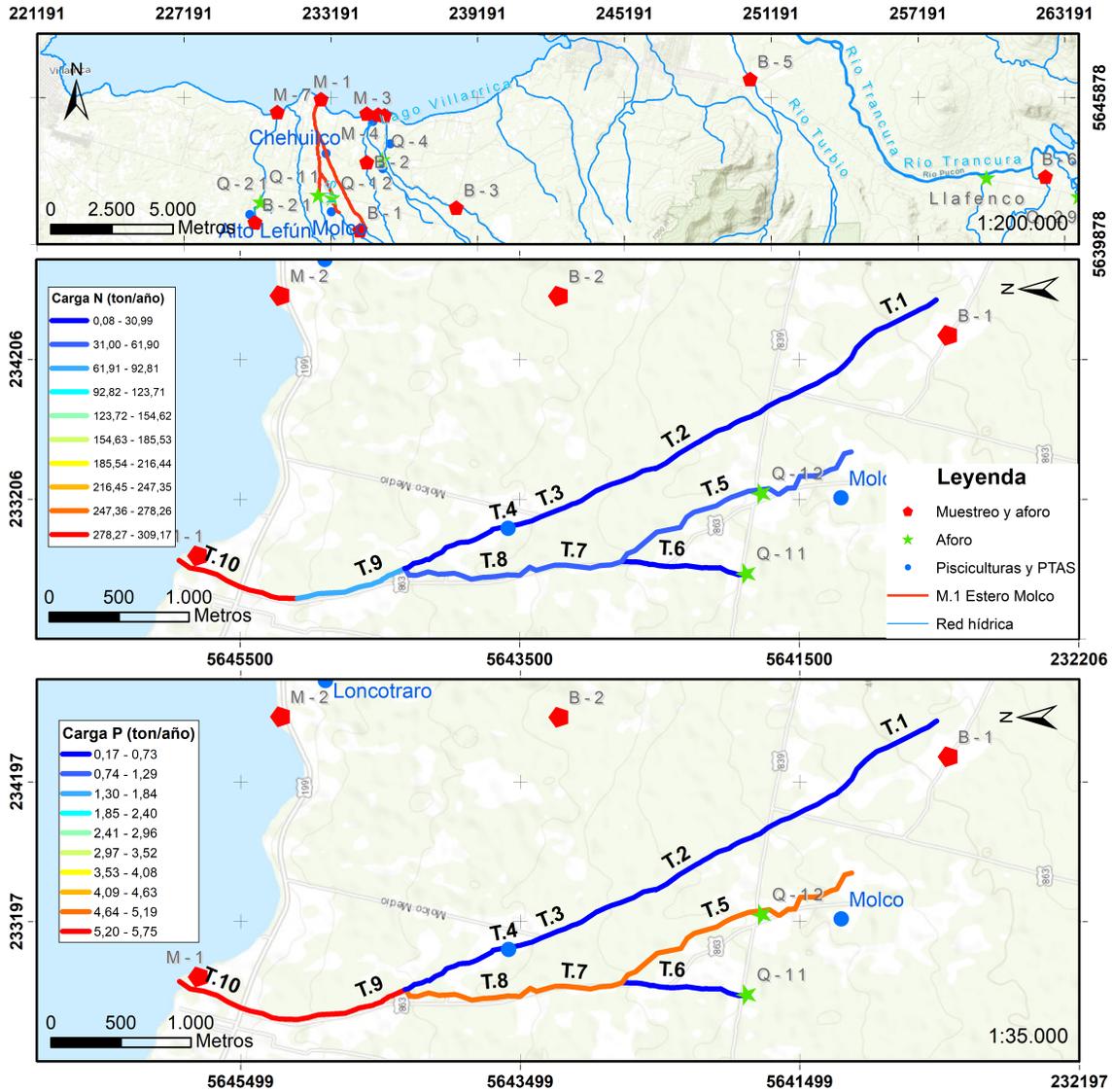
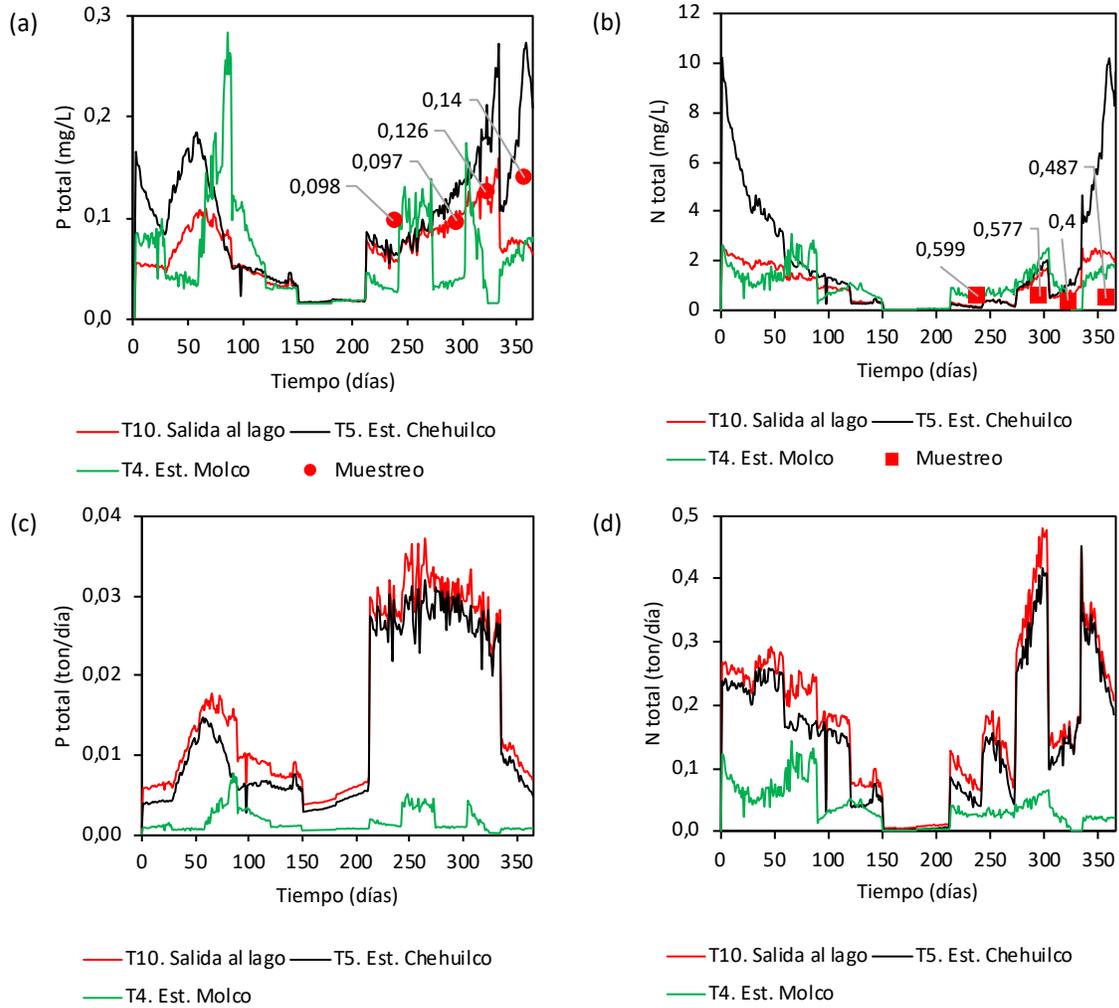
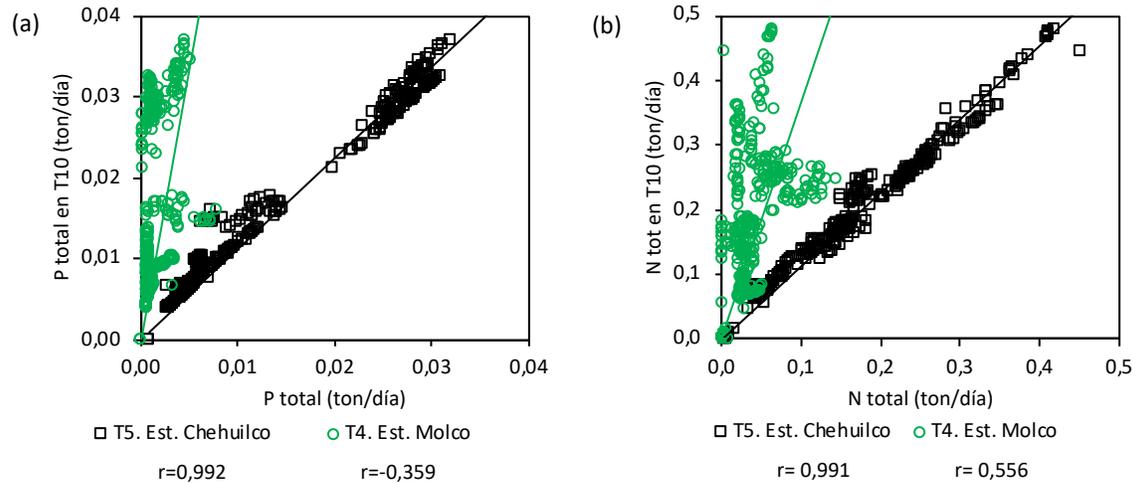


Figura 12. Esquema de la distribución de tramos para el estero Molco.



**Figura 13.** Modelación de transporte de nutrientes para estero Molco: Concentración de (a) Fósforo total y (b) Nitrógeno total; flujo másico en ton/día: (c) Fósforo total y (d) Nitrógeno total



**Figura 14.** Correlación de concentraciones entre el tramo de salida al lago (T.10) y los tramos con descargas de fuentes puntuales (T4 y T5): (a) Fósforo total y (b) Nitrógeno total.  $r$  corresponde al coeficiente de correlación de Pearson.

#### 4.2.2 Estero Loncotraro (M2)

El estero Loncotraro presenta descargas provenientes de la Piscicultura Loncotraro. La Figura 15 presenta un resumen esquemático de la ubicación de la Piscicultura y la división de los tramos en el estero. La Tabla 13 presenta la geometría utilizada para el desarrollo del modelo de transporte sobre el estero Loncotraro, donde la salida al lago corresponde al tramo 4 (T.4). La Piscicultura Loncotraro se encuentra ubicada en el tramo T.3. La carga de la fuente puntual se determinó y utilizó según lo planteado en la metodología, sección 3.5.

La validación del modelo de transporte se observa en la Figura 16a-b para Fósforo y Nitrógeno total con un  $U_P$  y  $U_N$  de 0,143 y 0,027 respectivamente. Al realizar un análisis comparativo del flujo másico por cada elemento entre el tramo T.4 (salida al lago) y el tramo que recibe descarga por la piscicultura (Figura 16c-d), es posible notar que el aporte de Nitrógeno y fósforo total provienen del tramo T.3. (ver Figura 17).

Tabla 13. Geometría utilizada para modelo de estero Loncotraro.

Nombre del segmento	Largo (m)	Ancho (m)	Área Superficial (m <sup>2</sup> )	Profundidad promedio (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo Residencia (día)	Velocidad (m/día)	Pendiente (m/m)
T.1 Est. Loncotraro	1025,83	5,00	5129,15	0,40	2051,66	0,01	0,89	0,0292308
T.2 Est. Loncotraro	883,22	3,45	3047,11	0,51	1554,03	0,01	1,01	0,0389401
T.3 Est. Loncotraro	113,16	1,9	215,00	0,62	133,30	0,001	1,51	0,0883258
T.4 Est. Loncotraro	296,83	1,90	563,98	0,62	349,67	0,002	1,51	0,0673474

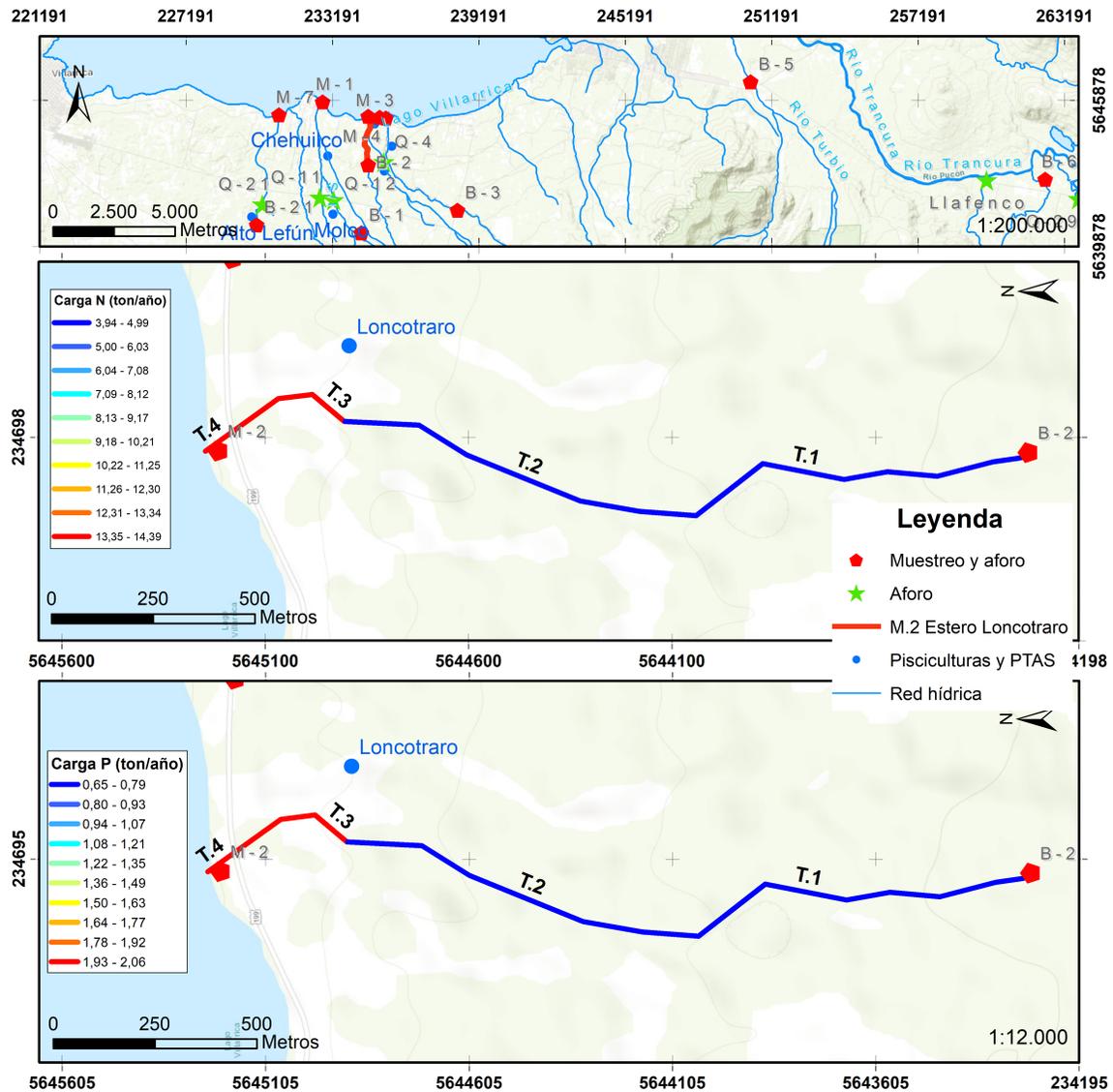
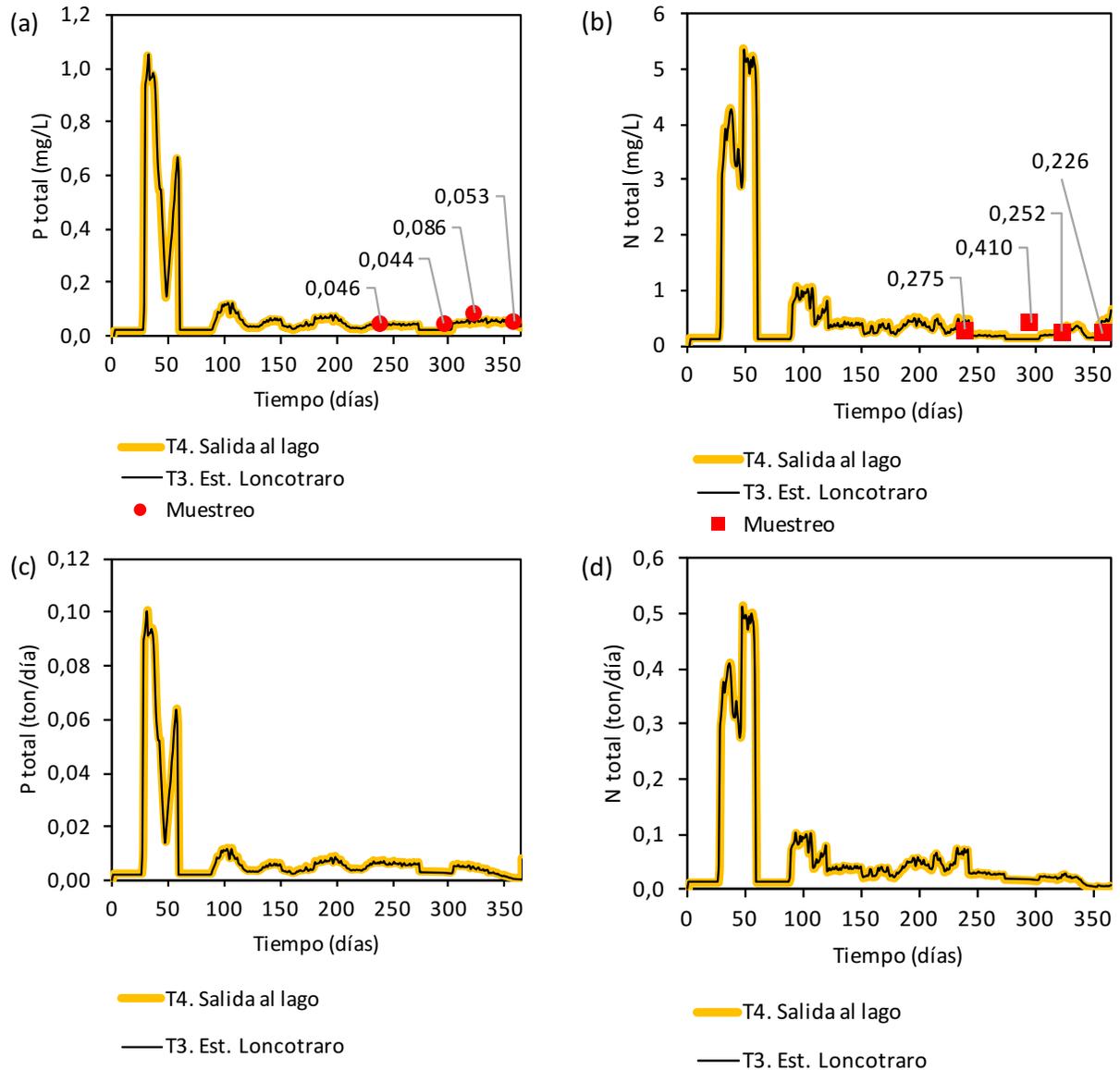
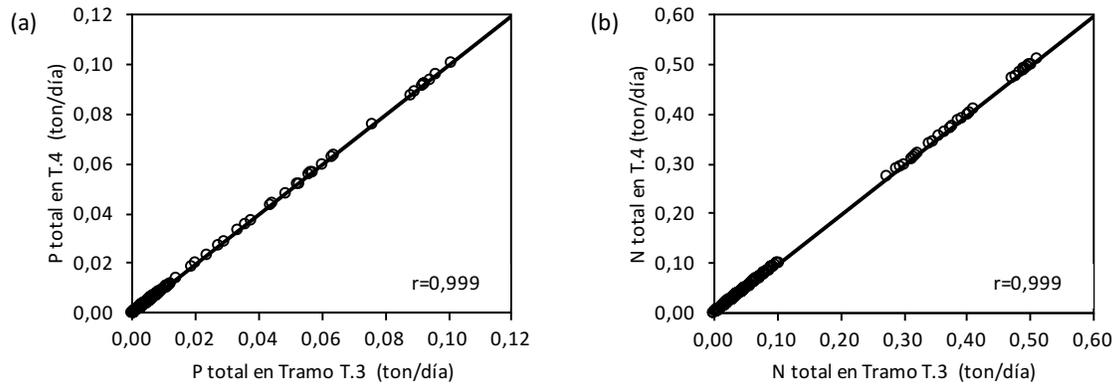


Figura 15. Esquema de la distribución de tramos para el estero Loncotraro.



**Figura 16.** Modelación de transporte de nutrientes para estero Loncostrarro: Validación del modelo según Concentración (a) Fósforo total y (b) Nitrógeno total. Modelación flujo másico en ton/día (c) Fósforo total y (d) Nitrógeno total.



**Figura 17.** Correlación de concentraciones entre el tramo de salida al lago (T.3) y el tramo con descarga T.2: (a) Fósforo total y (b) Nitrógeno total.  $r$  corresponde al coeficiente de correlación de Pearson.

#### 4.2.3 Estero Correntoso (M3)

El estero Correntoso presenta descargas provenientes de la Piscicultura La Cascada. La Figura 18 presenta un resumen esquemático de la ubicación de la Piscicultura y la división de los tramos en el estero. La Tabla 14 presenta la geometría utilizada para el desarrollo del modelo de transporte sobre el estero Correntoso, donde la salida al lago corresponde al tramo 6 (T.6). La Piscicultura La Cascada se encuentra ubicada en el tramo T.5. La carga de la fuente puntual se determinó y utilizó según lo planteado en la metodología, sección 3.5.

La validación del modelo de transporte se observa en la Figura 19a-b para Fósforo y Nitrógeno total con un  $U_P$  y  $U_N$  de 0,217 y 0,091 respectivamente. Al realizar un análisis comparativo del flujo másico por cada elemento entre el tramo T.6 (salida al lago) y el tramo que recibe descarga de la piscicultura (Figura 19c-d), es posible notar que el aporte de Nitrógeno y fósforo total provienen principalmente del tramo T.5.

Tabla 14. Geometría utilizada para modelo de estero Correntoso.

Nombre del segmento	Largo (m)	Ancho (m)	Área Superficial (m <sup>2</sup> )	Profundidad promedio (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo Residencia (día)	Velocidad (m/día)	Pendiente (m/m)
T.1 Est. Correntoso	1257,75	2,70	3395,93	0,25	848,98	0,03103	0,47	0,0476829
T.2 Est. Sin Nombre	1023,43	2,70	2763,26	0,38	1050,04	0,00808	0,31	0,0586003
T.3 Est. Correntoso	1755,00	3,55	6230,25	0,32	1962,53	0,07173	0,28	0,0569541
T.4 Est. Correntoso	1520,59	3,55	5398,09	0,32	1700,40	0,06215	0,28	0,0460136
T.5 Est. Correntoso	940,16	4,40	4136,70	0,25	1034,18	0,03780	0,29	0,0318946
T.6 Est. Correntoso	452,80	4,40	1992,32	0,38	757,08	0,02767	0,19	0,0882980

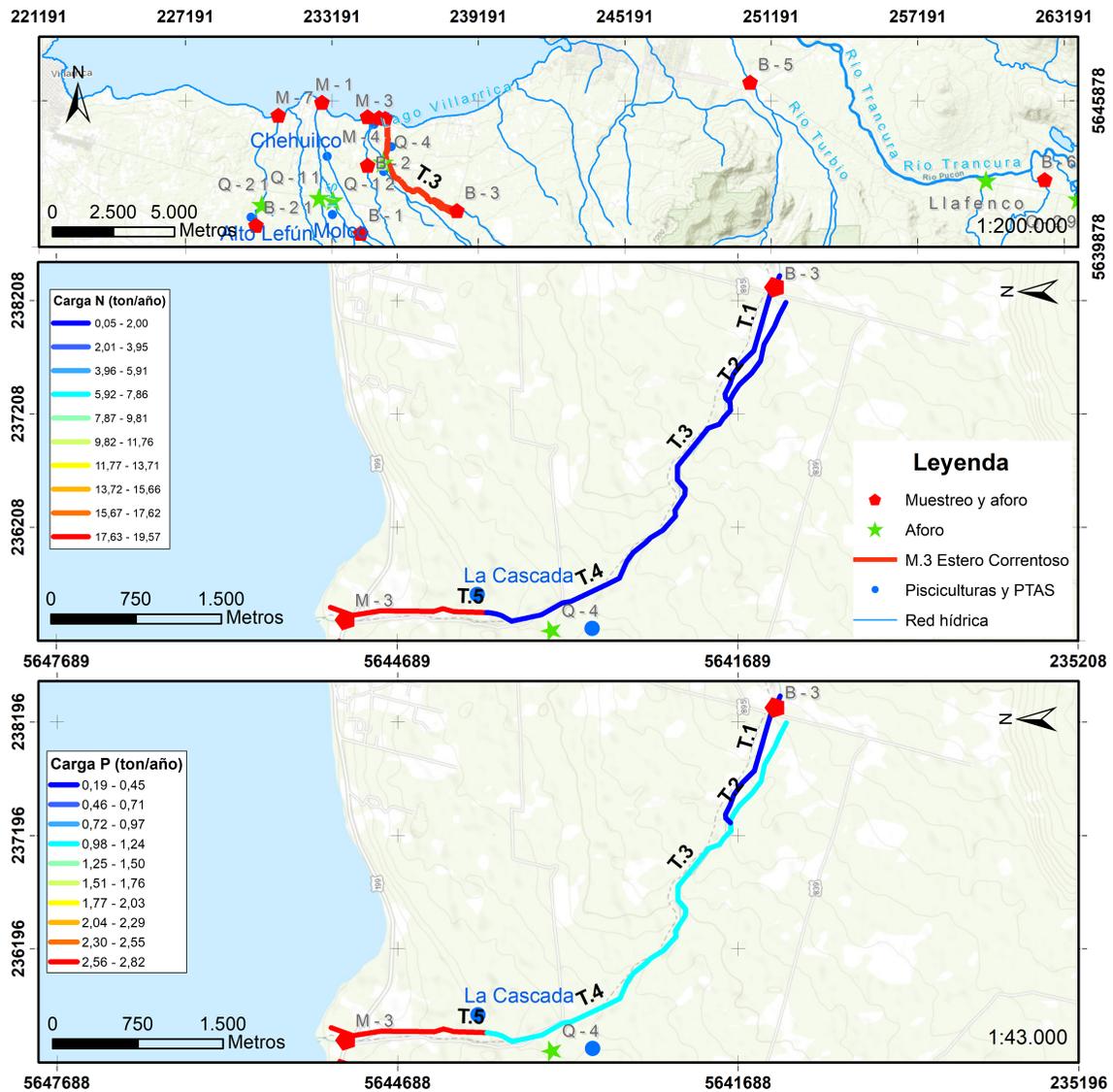
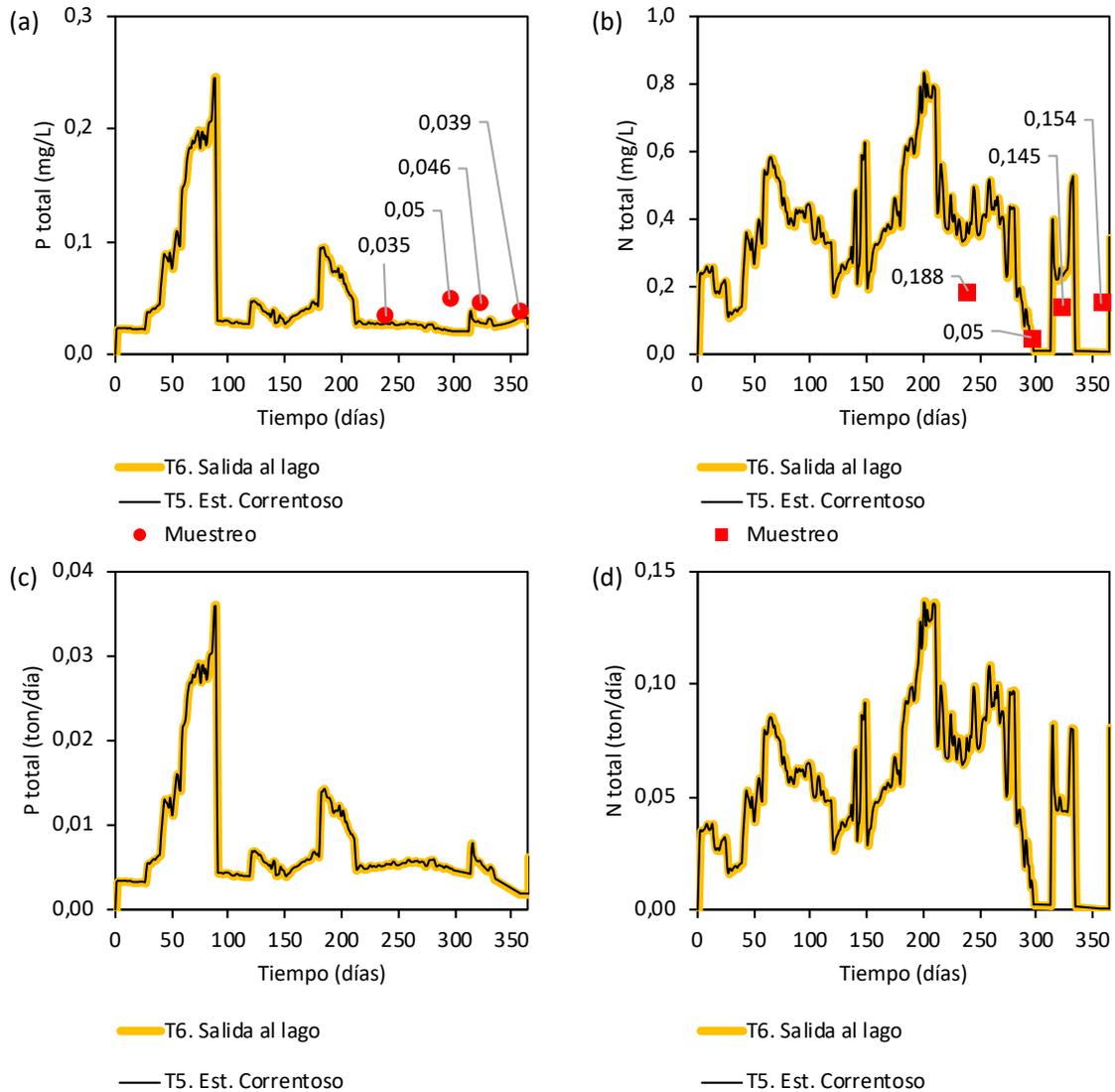
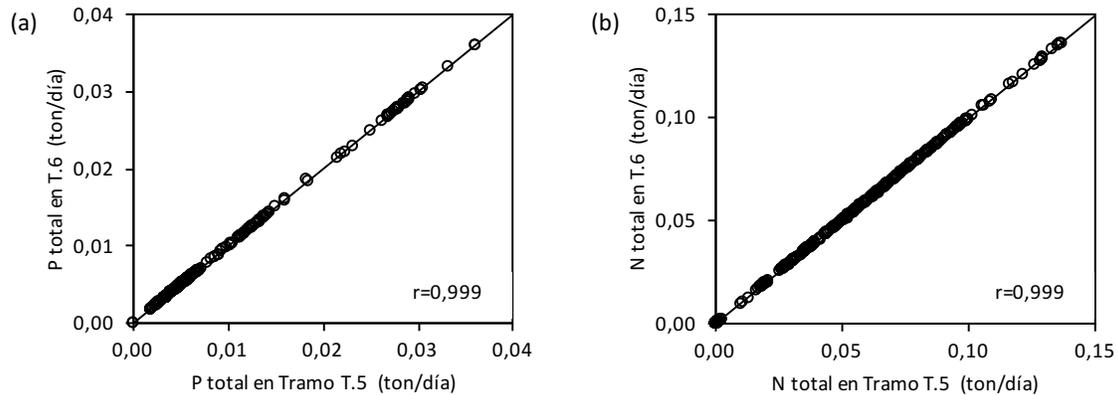


Figura 18. Esquema de la distribución de tramos para el estero Correntoso.



**Figura 19.** Modelación de transporte de nutrientes río Correntoso: Validación del modelo según Concentración (a) Fósforo total y (b) Nitrógeno total. Modelación flujo másico en ton/día (c) Fósforo total y (d) Nitrógeno total.



**Figura 20.** Correlación de concentraciones entre el tramo de salida al lago (T.6) y el tramo con descarga T.5: (a) Fósforo total y (b) Nitrógeno total.  $r$  corresponde al coeficiente de correlación de Pearson.

#### 4.2.4 Estero Los Chilcos (M4)

El estero Los Chilcos presenta descargas provenientes de dos pisciculturas, Piscicultura Los Chilcos y la Piscicultura Loncotraro. La Figura 21 presenta un resumen esquemático de la ubicación de las Pisciculturas y la división de los tramos en el estero. La Tabla 15 presenta la geometría utilizada para el desarrollo del modelo de transporte sobre el estero Los Chilcos, donde la salida al lago corresponde al tramo T.6. La Piscicultura Los Chilcos se encuentra ubicada en el tramo T.2 y la Piscicultura Loncotraro en el tramo T.5. La carga de las fuentes puntuales se determinó y utilizó según lo planteado en la metodología, sección 3.5.

La validación del modelo de transporte se observa en la Figura 22a-b para Fósforo y Nitrógeno total con un  $U_P$  y  $U_N$  de 0,205 y 0,837 respectivamente.

Respecto a la calibración del modelo de Nitrógeno total, se observa que el modelo sobre estima los valores, lo cual se ve reflejado en un valor de  $U_N$  alto (cercano a 1), lo cual refleja un mal ajuste del modelo para este parámetro. Esto puede deberse a dos factores. 1) la Piscicultura Los Chilcos ubicada en el tramo T.2 realiza dos declaraciones de descarga, una denominada “Descarga Antigua” y otra denominada “Descarga Nueva”, la revisar las fechas de declaración de ambas descargas, ambas se declaran para los mismo años, meses y días, cada una con concentraciones diferentes y caudales de descarga o restitución diferentes, lo que hace presumible que ambas descargas funcionan al mismo tiempo, por tal motivo, se optó por sumar ambas descargas. Esto puede explicar por qué el modelo sobre estima las



descargas. Otra razón puede ser que, al utilizar datos históricos y no datos del presente año, se haya omitido paros en la producción de la Piscicultura Los Chilcos.

Al realizar un análisis comparativo del flujo másico por cada elemento entre el tramo T.6 (salida al lago) y los tramos con descargas de pisciculturas (Figura 22c-d), es posible notar que el aporte de Nitrógeno y fósforo total provienen tanto del tramo T.2 y T.5 por igual. Un análisis de correlación confirma esta relación lineal entre el flujo másico en T.10, T.2 y T.5 (ver Figura 23).

**Tabla 15.** Geometría utilizada para modelo de estero Los Chilcos.

Nombre del segmento	Largo (m)	Ancho (m)	Área Superficial (m <sup>2</sup> )	Profundidad promedio (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo Residencia (día)	Velocidad (m/día)	Pendiente (m/m)
T.1 Est. Chilcos	1277,90	4,00	5111,60	0,47	2402,45	0,022	0,67	0,0264233
T.2 Est. Chilcos	906,25	4,00	3625,01	0,47	1703,76	0,016	0,67	0,0571537
T.3 Est. Chilcos	889,10	6,00	5334,60	0,32	1707,07	0,016	0,66	0,0224841
T.4 Est. Chilcos	464,89	8,00	3719,12	0,17	632,25	0,006	0,93	0,0316466
T.5 Est. Chilcos	160,92	8,00	1287,36	0,17	218,85	0,002	0,93	0,1186137
T.6 Est. Chilcos	251,80	8,00	2014,43	0,17	342,45	0,003	0,93	0,1287137

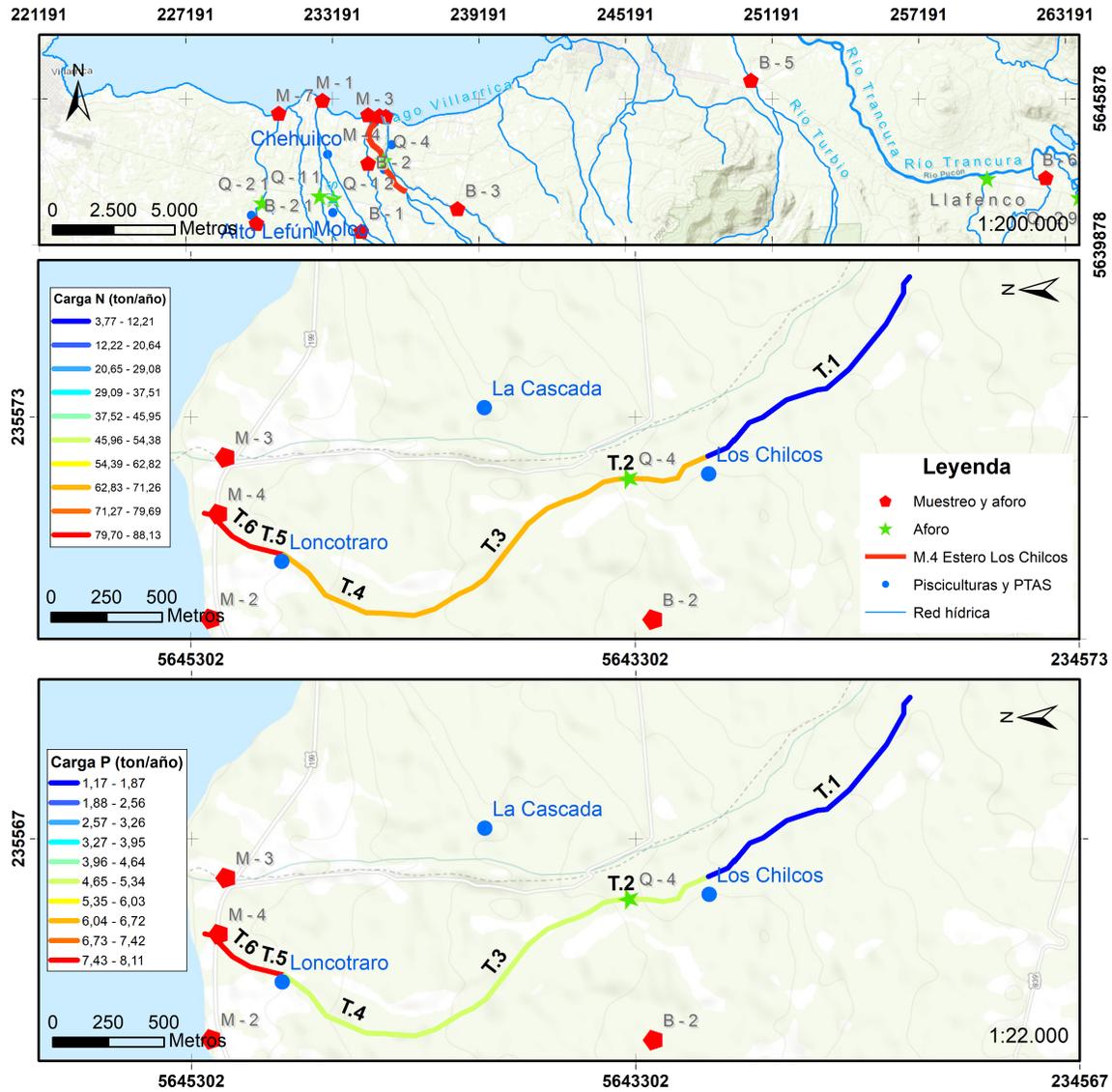
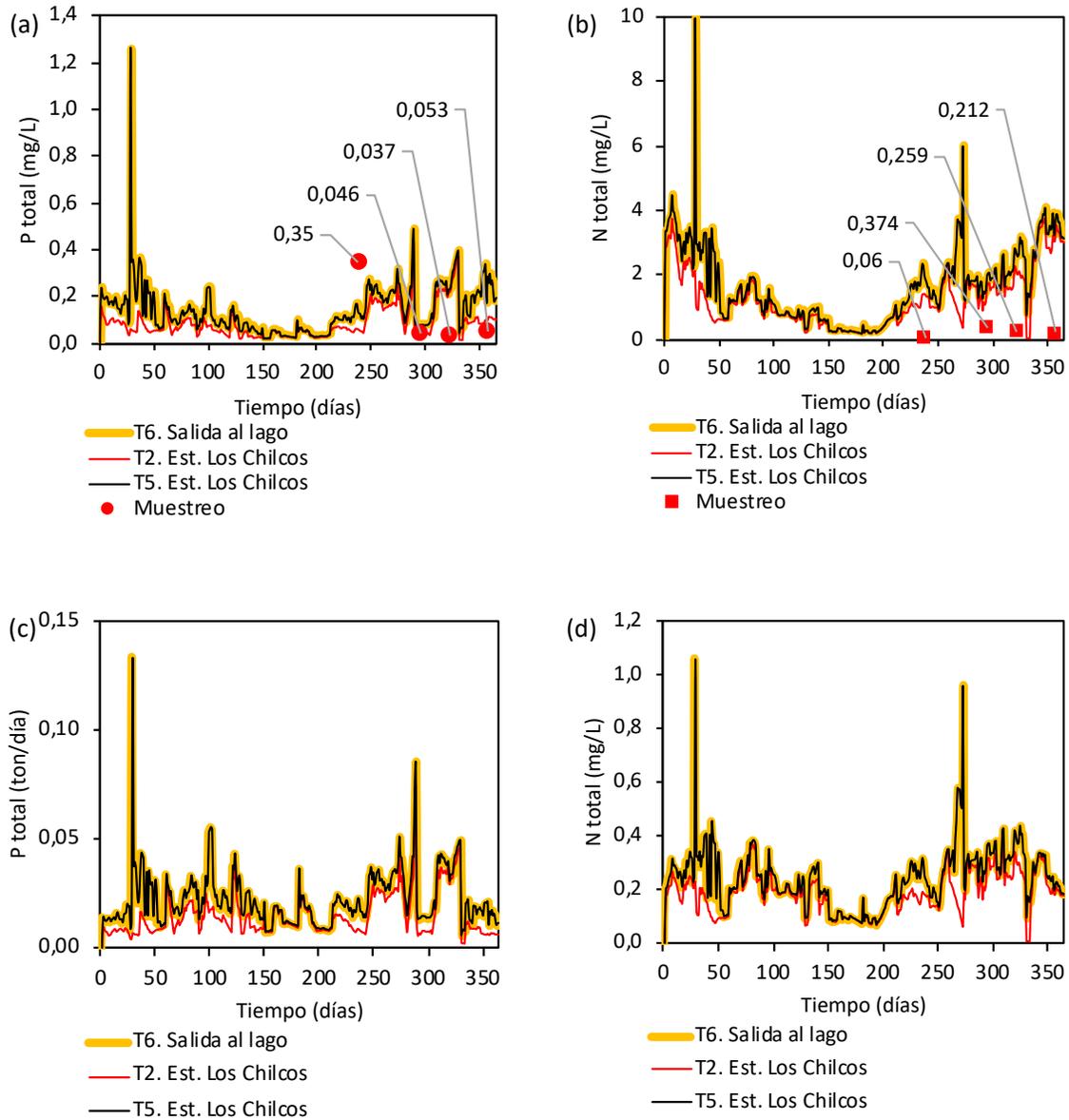
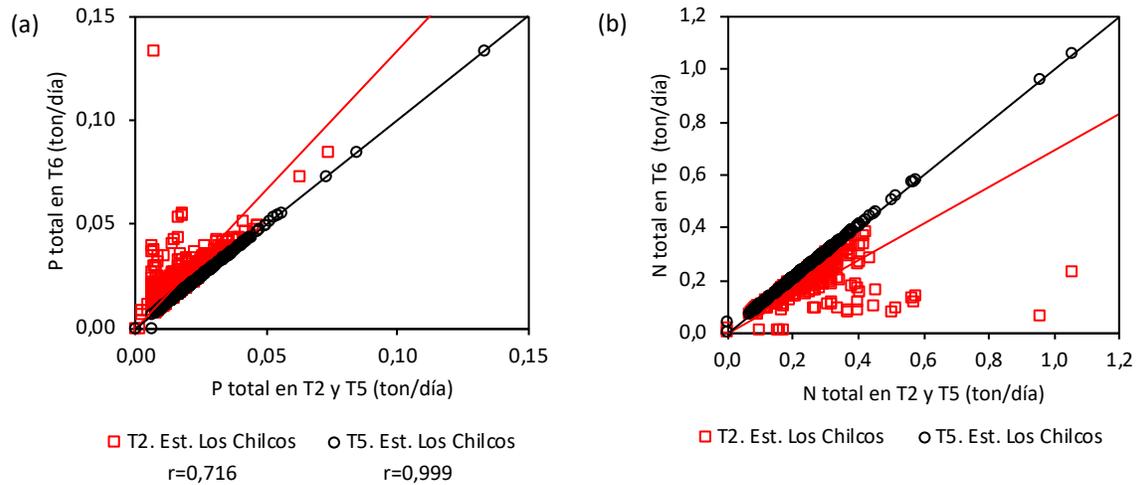


Figura 21. Esquema de la distribución de tramos para el estero Los Chilcos.



**Figura 22.** Modelación de transporte de nutrientes para estero Los Chilcos: Validación del modelo según Concentración (a) Fósforo total y (b) Nitrógeno total. Modelación flujo másico en ton/día (c) Fósforo total y (d) Nitrógeno total.



**Figura 23.** Correlación de concentraciones entre el tramo de salida al lago (T6) y los tramos con descargas por fuentes puntuales (T2 y T5): (a) Fósforo total y (b) Nitrógeno total.  $r$  corresponde al coeficiente de correlación de Pearson.

#### 4.2.5 Río Trancura (M5)

Para el cálculo de las series de tiempo respecto al flujo de cada uno de los cauces tributarios al río Trancura, se estableció un aporte porcentual de cada tributario según los aforos realizados en terreno en función del punto M-5 ubicado en el puente Quelhue según modelo topológico presentado en la Figura 6. Datos de altura tomados de forma diaria por la Dirección General de Aguas (DGA) en puente Quelhue permitió establecer una relación temporal entre la serie de tiempo medida en M5 y los aportes porcentuales de cada tributario, los valores de cada aporte se presentan en la Tabla 16. La carga de las fuentes puntuales se determinó y utilizó según lo planteado en la metodología, sección 3.5.

La geometría utilizada para cada tramo del modelo del río Trancura se presentan en el Anexo 3. Geometría río Trancura, esto debido a la extensión de la tabla por el número de tramos utilizados (118 tramos).

La Figura 24 presenta el resumen de cargas de todos los tramos de modelación para el Río Trancura, del cual es posible observar que, para el caso del Nitrógeno total, este vendría principalmente desde Liucura. Respecto del Fósforo total, este provendría principalmente del Río Trancura.



La Figura 25 presenta un esquema de la zona de desembocadura del río Trancura al Lago Villarrica, el punto de muestreo y aforos M5 se ubica en el tramo 103 (T.103) de la figura. La Figura 26a-b presenta los resultados del modelo de transporte y la validación según los muestreos realizados en M5 (puente Quelhue) con un  $U_P$  y  $U_N$  de 0,398 y 0,246 para Fósforo y Nitrógeno total respectivamente. Es posible observar que los valores de Fósforo total son subestimados por el modelo, esto puede deberse al hecho de que para el desarrollo del modelo se han considerado las condiciones de borde como puntos de entrada para el aporte de Fósforo y Nitrógeno propios de la cuenca. El problema viene por el hecho de que, para el caso del modelo desarrollado para el Río Trancura, el área existente entre el borde lago y los puntos establecidos como condición de borde es muy grande, de esta manera, el suelo (con sus distintos usos) puede estar aportando de forma significativa, lo cual no es recogido por el modelo. Esta es una de las limitaciones del estudio, la cual debe ser considerada en caso de una posible continuación del mismo.

Por otro lado, se muestran las series de tiempo de los ríos aportantes hasta M5, los cuales son río Liucura (T.100), río Turbio (T.102) y río Trancura (T.76). La Figura 26c-d presenta las series de tiempo para los mismos tramos en función del flujo másico ton/día, estas muestran que en apariencia los principales aportes de N y P provienen de Liucura (T.100) y Trancura (T.76). Las correlaciones presentadas en la Figura 28 comprueban esta observación, el aporte del río Turbio parece no ser significativo comparado con el aporte de los dos ríos antes mencionados; lo mismo se observa para el N total.

Finalmente, y a modo de alcance, es importante hacer notar que la diferencia entre la Figura 26a-b y la Figura 26c-d corresponde al hecho de que las dos primeras presentan los valores en concentración (mg/L), mientras que las dos segundas en valores de carga (ton/día), de esta manera el Río Liucura muestra una mayor concentración de nutrientes, mientras que al observar la carga, esta es menor, esto se explica por el hecho de que el Río Liucura trae menor caudal que Trancura, la Figura 26 presenta los valores de caudal para cada segmento de río mencionado.

**Tabla 16.** Distribución de flujos para ríos y esteros tributarios al río Trancura.

Nombre	ID	Fecha				
		31-jul a 2-ago-17	26-sept-17	22-nov-17	19-dic-17	23-ene-18
Río Turbio	B-5	8,72%	3,73%	2,62%	2,13%	0,47%
Río Liucura	B-17	16,18%	21,36%	19,01%	18,07%	21,55%
E. Quetroleufu	B-16	0,90%	1,23%	0,22%	1,29%	0,23%
E. Carileufu	B-19	0,05%	0,02%	0,03%	0,04%	0,05%
Estero Carhuello	B-20	2,82%	3,08%	0,73%	1,57%	1,86%
Río Caburgua	Q-34	4,30%	7,71%	4,51%	3,57%	12,89%
E. Llafenco	Q-31	N/A	N/A	1,32%	0,85%	1,25%
Río Palgulil	B-6	12,45%	12,21%	17,71%	19,79%	16,74%
Río Cavisañi	B-11	0,48%	0,02%	0,70%	0,78%	0,58%
	Q-32	3,94%	4,14%	4,19%	1,91%	4,84%
	B-9	2,61%	0,98%	2,14%	2,03%	2,48%
	B-8	2,87%	1,31%	1,22%	0,55%	0,90%
	Q-25	0,59%	0,25%	0,19%	0,27%	0,21%
	Q-8	0,51%	0,14%	0,18%	0,08%	0,11%
	Q-7	1,36%	0,22%	0,24%	0,16%	0,23%
	B-7	0,43%	0,18%	0,14%	0,06%	0,13%
E. sin nombre1	Q-23	0,26%	0,33%	0,27%	N/A	0,30%
Río Pangui	B-15	6,20%	8,75%	6,30%	5,39%	4,86%
Río Maichin	B-14	15,31%	15,43%	20,44%	19,45%	14,42%
Río Trancura	Q-22	1,13%	0,73%	0,53%	0,17%	0,60%
	B-12	11,68%	10,82%	13,59%	11,98%	4,13%
	Q-33	6,66%	6,92%	3,45%	9,70%	10,86%
E. sin nombre2	B-13	0,56%	0,45%	0,27%	0,16%	0,32%
<b>Quelhue (Trancura)</b>	<b>M5</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

\*N/A -> No Aforado

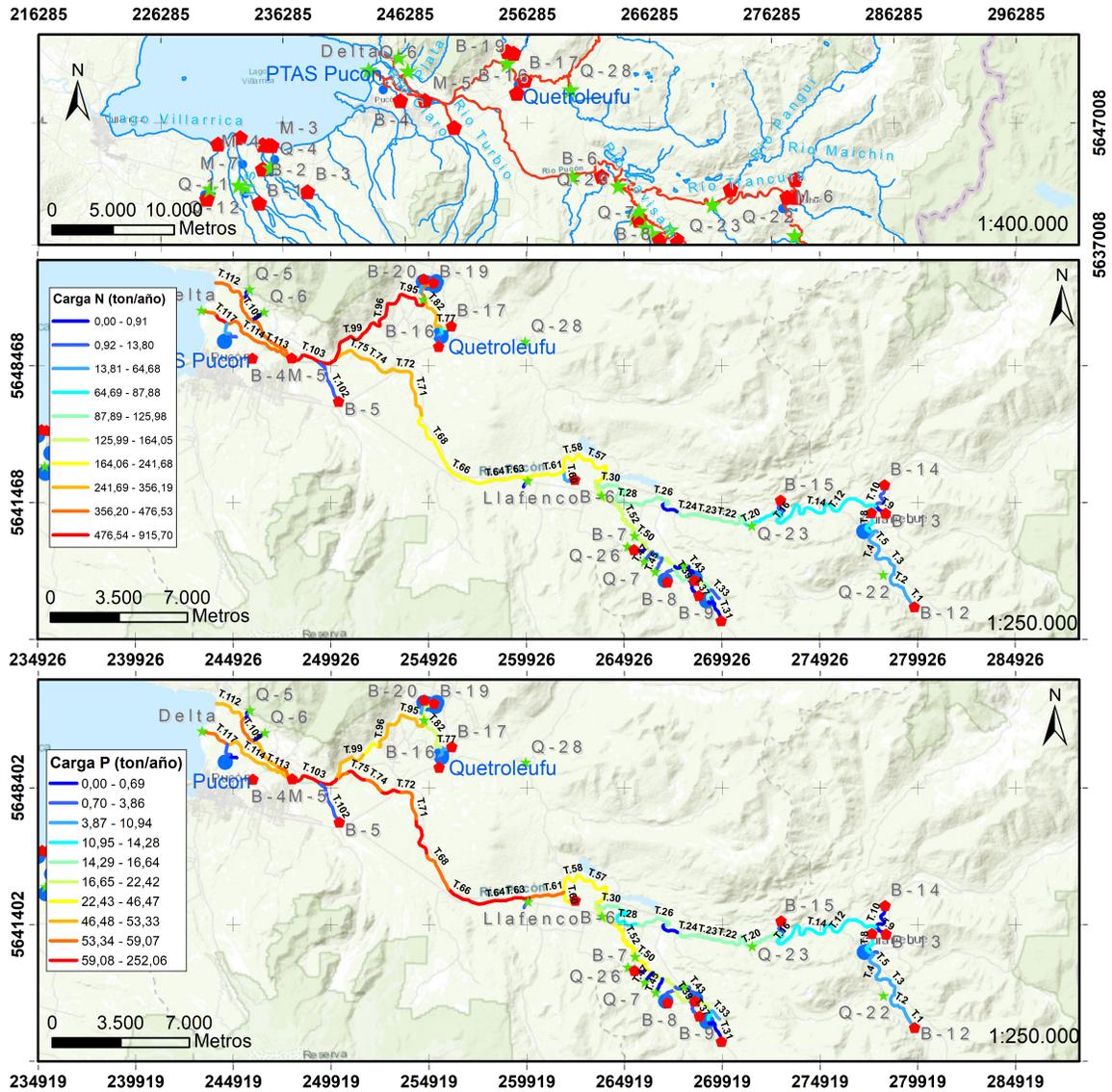


Figura 24. Esquema de la distribución de tramos para el río Trancura sector Pucón.