UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

EVALUACIÓN DE FUENTES COMPLEMENTARIAS PARA LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE DE PUERTO NATALES

Memoria de Título presentada por

Genesis Ignacia Nabi Sabando Aranda

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Alberto Javier Kresse Zamorano

Profesora Correferente
Vivian Clarisa Aranda Nuñez

MAYO, 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de fuentes complementarias para los sistemas de producción de agua potable de Puerto Natales

Nombre del candidato(a): Genesis Ignacia Nabi Sabando Aranda

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Vivian Clarisa Aranda Núñez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28/10/2026 **Firma:**



Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/2026 **Firma:**



Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

EVALUACIÓN DE FUENTES COMPLEMENTARIAS PARA LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE DE PUERTO NATALES

AUTOR:

Genesis Ignacia Nabi Sabando Aranda

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Profesor Guía	.....	.....
Miembro 1 Comisión	.....	.....
Miembro 2 Comisión	.....	.....

(Santiago), Chile, (FECHA DEFENSA)

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia, en especial a mi tía Cati, mi abuelita, mi mamá, mis hermanas Carla, Natalia y Sofia, y mi perrito Juanin, quienes, ya sea desde la cercanía del día a día o a la distancia, fueron un apoyo y contención fundamental en todo este proceso universitario. Agradezco también a mi papá, quien, a pesar de no encontrarse en este plano terrenal, se que estaría orgulloso de ver el camino que he recorrido y el lugar en el que hoy me encuentro.

A mis amigos y amigas, agradezco su ánimo constante, compresión y apoyo a lo largo de esta etapa, los cuales hicieron mi camino universitario más llevadero y feliz.

A mi profesor guía, Alberto Kresse, y mi profesora correferente, Vivian Aranda, quienes me guiaron durante todo este tiempo y me ayudaron a cumplir uno de los hitos más importantes de mi carrera universitaria.

Finalmente, agradezco a Dios por la fortaleza y guía brindada en esta etapa, que no solo representa un logro académico, sino también un profundo crecimiento personal.

Haber llegado a este punto no es merito únicamente mío, sino el resultado del apoyo permanente que he recibido a lo largo de mi vida, por lo cual les estaré eternamente agradecida.

Índice

1. Introducción **3**

2. Objetivos **4**
2.1. Objetivo general 4
2.2. Objetivos específicos 4

3. Antecedentes generales **4**
3.1. Escasez hídrica y estrategias de gestión del recurso 4
3.2. Fuentes de agua convencionales y no convencionales 5
3.3. Situación hídrica de Puerto Natales 6
3.4. Marco normativo de los servicios sanitarios y proyectos de desalinización en Chile . . 8

4. Metodología **10**

5. Escenarios de demanda **11**

6. Dimensionamiento y diseño de las soluciones **13**
6.1. Análisis de fuentes alternativas 13
6.2. Dimensionamiento 15
6.3. Laguna Sofía 16
6.4. Río Hollemberg 21
6.5. Desalación de agua de mar 24

7. Evaluación económica e impacto tarifario **33**
7.1. Costos de inversión (CAPEX) 33
7.2. Costos de operación (OPEX) 35
7.3. Impacto tarifario 38
7.4. Análisis de sensibilidad 40
7.4.1. Impacto de la base de usuarios sobre el incremento tarifario. 40
7.4.2. Alternativas de cofinanciamiento 41

8. Análisis de resultados **44**

9. Conclusiones **46**

A. Anexos **50**

Evaluación de fuentes complementarias para los sistemas de producción de agua potable de Puerto Natales

Genesis Sabando, Alberto Kresse, Vivian Aranda

Universidad Técnica Federico Santa María

1. Introducción

El agua es un recurso fundamental para la vida y el desarrollo socioeconómico y sostenible de las sociedades. Más del 99 % de la hidrosfera se concentra en los océanos, por lo que la parte disponible en lagos y ríos es comparativamente pequeña, lo que hace que su acceso pueda verse amenazado ante cambios en las condiciones del entorno o ante un aumento en la demanda (Wetzel, 2023). De hecho, este recurso se ve afectado por la actividad humana y el cambio climático, generando zonas bajo estrés hídrico, que inciden en una menor producción económica y amenazan el desarrollo sostenible de algunas comunidades (PNUMA, 2023). Por esto, se ha transformado en una tendencia global la gestión adecuada y oportuna de los recursos hídricos, que incentive la inversión en infraestructura y el fomento de su uso eficiente (Banco Mundial, 2022).

Chile no es ajeno a estos cambios. Según el estudio de *World Resources Institute* del Pacto Mundial de las Naciones Unidas (2019), el país se encuentra en un nivel de estrés hídrico alto, ubicándose en la posición 18 de 164 países en lo que respecta a su exposición al cambio climático, dejando a Chile como el país más afectado de América Latina respecto de esta materia.

En la región de Magallanes, en particular, la comuna de Puerto Natales se enfrenta a un desafío creciente con respecto al abastecimiento de agua potable, por el aumento proyectado para la demanda de la ciudad y por las variaciones que se ha observado en la única fuente de la localidad, el estero Dumestre. En efecto, la continuidad de suministro se ha visto alterada ante el desarrollo de actividades económicas en la zona, con la llegada de grandes consumidores, como hoteleras y pesqueras, y por la variación de caudal y calidad que ha experimentado el estero Dumestre debido a los efectos combinados del alza de las temperaturas y el cambio en los patrones de lluvia.

En este contexto, la empresa prestadora de servicios sanitarios de la ciudad, Aguas Magallanes S.A., proyecta una demanda cercana a 145 [L/s] a 2050, según el plan de desarrollo de la empresa (2021). Frente a este escenario, el presente estudio tiene como propósito evaluar alternativas de nuevas fuentes para la ciudad, incorporando soluciones no tradicionales, como el uso de agua de mar desalada, mediante un análisis basado en criterios técnicos, sociales, económicos y ambientales, que permitan el desarrollo futuro de la ciudad de manera sustentable y eficiente.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar potenciales fuentes alternativas de producción de agua potable para la comuna de Puerto Natales, tanto tradicionales como no tradicionales, que permitan satisfacer la demanda de la localidad en el tiempo, considerando sus implicancias técnicas, sociales, ambientales y económicas.

2.2. Objetivos específicos

1. Estudiar la oferta de recursos hídricos, y determinar la demanda actual y futura de agua potable a ser cubierta en la zona por las fuentes alternativas.
2. Analizar los posibles trazados de conducciones de agua de las distintas fuentes a analizar en la zona de estudio.
3. Dimensionar distintas alternativas de sistemas de producción de agua potable para Puerto Natales con sus respectivos sistemas de transporte.
4. Estimar los costos de inversión y operación, y evaluar las fortalezas y vulnerabilidades de cada alternativa.
5. Identificar las ventajas y desventajas prácticas en la ejecución y eventual operación de cada una de las propuestas, para recomendar la opción con mejor perspectiva, evaluando alternativas de financiamiento para su eventual construcción.

3. Antecedentes generales

3.1. Escasez hídrica y estrategias de gestión del recurso

A nivel mundial, muchos países enfrentan desafíos significativos en cuanto a la disponibilidad de agua, que incluyen escasez, deterioro de la calidad, sequías e inundaciones, generando problemas de estabilidad social, política, económica y ambiental (Koncagül et al., 2024). Estos problemas se deben principalmente a la disminución del caudal en cuencas alimentadas por glaciares, la disminución de las precipitaciones, la variabilidad interanual de la precipitación y el aumento de la evapotranspiración por efecto de una mayor temperatura del aire (Bates et al., 2008). Chile no está exento de estos problemas, en muchas regiones del país los derechos de aprovechamiento existentes superan a la disponibilidad real del recurso llevando a declarar numerosas regiones agotadas tanto en sus aguas superficiales como subterráneas (Santibáñez et al., 2016).

En la región de Magallanes, en particular, la comuna de Puerto Natales presenta desafíos con respecto al abastecimiento de agua potable, debido al aumento proyectado para la demanda de la ciudad y por las variaciones que se han observado en el estero Dumestre, la única fuente de la localidad. En efecto, la continuidad de suministro se ha visto alterada ante la llegada de grandes consumidores, como hoteleras y pesqueras, y por la variación de caudal y calidad que ha experimentado el estero Dumestre, por lo que es necesario crear planes preventivos o desarrollar proyectos que permitan evitar la escasez del recurso en la zona. La búsqueda de soluciones para la escasez hídrica es un problema global que muchas ciudades han enfrentado con diversas estrategias. En Singapur, por ejemplo, ante la necesidad de diversificar sus fuentes hídricas y minimizar su

dependencia extranjera, apostó por el reciclaje de aguas grises, que, aunque su uso es principalmente industrial, ha podido ser utilizada en uso doméstico para situaciones de emergencia (Morales Estay, 2022). El proyecto NEWater, en este país, es el primer máster plan del agua, diseñado en 1972, compuesto por "cuatro grifos": agua de captación local (lluvias, ríos, etc), agua importada (desde Malasia), agua tratada y agua desalinizada. Este plan se diseñó inicialmente como respaldo en caso de que la ciudad alguna vez tuviera problemas para conseguir agua en otro lugar, como sucedió en el año 2017 cuando se suspendió el envío de agua desde Malasia. En la práctica demostró ser una alternativa de uso efectivo de agua reciclada para satisfacer las necesidades de los consumidores.

Otro ejemplo de iniciativa en el ámbito nacional es el proyecto de desalinización en la región de Atacama, operado por Nueva Atacama en la ciudad de Caldera, que ha permitido proporcionar agua potable a comunidades costeras donde los recursos hídricos son escasos (Briceño & Aníbal, 2023). Este tipo de proyectos sin embargo, enfrenta desafíos técnicos y financieros significativos, así como preocupaciones ambientales relacionadas con la salmuera generada como subproducto del proceso de desalinización. En el caso particular de Atacama, estos desafios fueron cubiertos con distintas técnicas constructivas y modelos de negocio, que permitieron garantizar el suministro de las ciudades de Caldera, Chañaral y Copiapo, demostrando el potencial de las soluciones no convencionales para abordar la escasez hídrica en Chile y en todo el mundo, aún cuando este tipo de soluciones requiera de una mayor inversión.

Otra estrategia para la gestión del agua, es la recarga o infiltración de acuíferos, que consiste en desarrollar intervenciones que permitan favorecer o inducir la infiltración en aguas superficiales hacia las napas subterráneas. Su implementación requiere un suelo con aptitud de infiltración y un acuífero que admita el almacenamiento sin pérdidas significativas, por lo que su aplicabilidad depende de la hidrogeología local (*Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012–2025*, s.f.). Un caso ilustrativo en Chile se reporta en la Región del Maule, comuna de Curepto, donde se han implementado zanjas o drenes de infiltración en laderas desde 2015 como medida para retener escorrentía y favorecer la recarga. Estas obras pueden acumular aproximadamente 80 - 100 litros por episodio de lluvia, contribuyendo a mantener la humedad del suelo, reducir la erosión y mejorar la resiliencia productiva en condiciones de escasez hídrica ("Infiltración de acuíferos, la solución basada en la naturaleza y de bajo costo para enfrentar la escasez hídrica", 2021).

3.2. Fuentes de agua convencionales y no convencionales

Dentro de las propuestas de solución para la escasez hídrica, se identifican normalmente a las fuentes como convencionales o no convencionales. Dentro de las convencionales esta la extracción de agua a partir de ríos, lagos, aguas subterráneas y glaciares, donde a menudo se ven representados en forma de embalses, lagos artificiales, captaciones y sistemas de extracción mediante pozos, donde el agua es captada, tratada y luego distribuida a través de tuberías y sistemas de elevación para el consumo humanos y otros usos (*Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012–2025*, s.f.).

Por otro lado, las principales fuentes no convencionales se refieren mayormente a las aguas recicladas y desaladas. La reutilización de aguas se define como "la aplicación, antes de su devolución al dominio público hidráulico y al marítimo terrestre para un nuevo uso privativo de las aguas que, habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o procesos de depuración establecidos en la correspondiente autorización de vertido y a los necesarios par alcanzar la calidad requerida en función de los usos a que se van a destinar" (España, Ministerio de la Presidencia, 2007).

Su uso se ha destinado principalmente al riego agrícola, y en menor cantidad, para uso industrial y urbano.

La desalinización por su parte, corresponde al conjunto de procesos mediante los cuales se eliminan las sales disueltas en aguas salobres o marinas, con el objetivo de obtener agua para el consumo humano, industrial o agrícola. Entre sus distintas tecnologías de uso, la ósmosis inversa se ha consolidado como el método de desalinización más utilizado a nivel mundial, gracias a su mayor eficiencia y grado de desarrollo tecnológico. Además, una de sus principales ventajas radica en la disponibilidad prácticamente ilimitada de la fuente de agua, su menor dependencia a las condiciones climáticas, presentando beneficios como la reducción de la dependencia de recursos hídricos continentales, mejora en la seguridad hídrica, impulsa el desarrollo económico local y genera innovación y crecimiento de tecnologías sostenibles. Sin embargo, este proceso presenta desventajas relevantes, como el alto requerimiento energético, elevados costos de producción y potenciales impactos ambientales sobre los ecosistemas marinos asociados a la descarga de salmuera (Zarza, n.d.).

En Chile, según la Asociación Chilena de Desalación y Reúso (ACADES) en conjunto con la Corporación de Bienes de Capital (CBC), se registran a marzo de 2025, 24 plantas desaladoras de tamaño industrial operando con una capacidad mayor a 20 [L/s], más de 40 proyectos en etapas de construcción e ingeniería relacionados con la extracción, transporte y desalación de agua de mar y con el reúso de aguas residuales, donde 15 de estos proyectos suministrarán agua exclusivamente a operaciones mineras, 12 a producción de hidrógeno o amoníaco verde, 11 son multipropósito-minero y 3 multipropósito-consumo humano. Esto representa una creciente inversión en fuentes no convencionales de agua, que buscan garantizar seguridad hídrica en cuencas deficitarias, disminuyendo la presión sobre fuentes continentales (ACADES, 2025).

3.3. Situación hídrica de Puerto Natales

Puerto Natales es una ciudad portuaria ubicada en el extremo austral de Chile, entre el Golfo Almirante Montt y el Seno de Última Esperanza, limitando al norte con las comunas de O'Higgins y Tortel, y al sur con las comunas de Río Verde y Punta Arenas, en la Región de Magallanes y de la Antártida Chilena (Aguas Magallanes S.A., 2021). Es ampliamente conocida por ser la puerta de entrada al parque natural de Torres del Paine y gran parte de su territorio comunal se encuentra protegido por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE), el cual es administrado por CONAF con el propósito de velar por la protección de ecosistemas, suelos, bosques, fauna y paisajes. En la actualidad, esta ciudad se encuentra conectada por vía terrestre a la capital regional, Punta Arenas, y, llegan embarcaciones desde la ciudad de Puerto Montt que conectan a la región con el resto del país, ya que aún no existe una ruta por vía terrestre que lo permita (Municipalidad de Natales, 2019).

En términos de caracterización territorial, se encuentra en la cuenca costera entre Seno Andrew y Río Hollemberg e islas orientes (MOP, n.d.), en un área donde confluyen la estepa magallánica, el matorral xerófito y el bosque magallánico caducifolio, y a diferencia de la mayoría de las ciudades del país, se localiza en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, conocida también como Andes Patagónicos. Con respecto al clima, éste es de carácter trasandino con degeneración esteparia, donde las precipitaciones disminuyen en relación a las laderas occidentales de la cordillera y de la región, ya que las masas de aire llegan con poco contenido de humedad luego de atravesar las cumbres de

la cordillera, dando lugar al característico paisaje tipo estepa (Aguas Magallanes S.A., 2021).

Según el plan de desarrollo comunal de Puerto Natales (2019), la población para el año 2017 era de 21.477 habitantes, donde un 48.8 % corresponde a mujeres y un 51.2 % a hombres, concentrando el 12.9 % de la población regional. Además, todas las localidades rurales aledañas, a excepción de Río Rubens y Villa Renoval, han ido perdiendo población.

El desarrollo económico de la zona está fuertemente asociado a los recursos naturales y a la posición geográfica de la ciudad. Los principales sectores productivos son el minero/energético, pesca y acuicultura, servicios marítimos y portuarios, y también el sector ganadero y forestal. Sin embargo, en los últimos años es el turismo el sector con mayor crecimiento y dinamismo, ya que existen actualmente 27 atractivos turísticos, lo que atrae la visita de extranjeros y chilenos durante casi todo el año (Municipalidad de Natales, 2019).

En términos de recursos hídricos, presenta un conjunto de vulnerabilidades asociadas al aumento sostenido de la demanda de agua potable y la presión de actividades productivas. Según Escenarios Hídricos 2030 (2025), el futuro hídrico de la Región de Magallanes requiere la definición de hojas de ruta orientadas a fortalecer la resiliencia de los sistemas de abastecimiento de agua en ciudades como Puerto Natales y Porvenir. El crecimiento poblacional intercensal, concentrado más en áreas urbanas, ha incrementado los requerimientos de agua potable a nivel comunal. A esta presión demográfica se suma la expansión de actividades industriales, en particular de la acuicultura, lo que ha intensificado la presión sobre ecosistemas acuáticos y fuentes de abastecimiento. En paralelo, el incremento de la superficie agrícola, en sectores como Huertos Familiares, ha generado una demanda creciente de agua para fines productivos.

En el ámbito rural, el abastecimiento de agua depende mayoritariamente de sistemas de servicios sanitarios rurales (SSR), los cuales presentan infraestructura envejecida, vulnerabilidad frente a fallas técnicas, eventos climáticos extremos y aumentos de demanda. Además, la ausencia de redes de alcantarillado y el uso de sistemas de saneamiento individuales ineficientes, refuerzan los riesgos sanitarios (Escenarios Hídricos 2030, 2025).

En este contexto, se dificulta anticipar situaciones de mayor escasez de agua, lo que puede afectar el abastecimiento tanto en la zona urbana como rural de Puerto Natales. Un ejemplo del impacto que tienen estos efectos, fue lo ocurrido en el año 2017, donde debido a eventos de lluvias intensas hubo un aumento de sedimentos en el estero Dumestre, derivando al corte masivo de agua potable por 4 días, lo que provocó manifestaciones por parte de la población generando cortes en la Ruta 9 (Municipalidad de Natales, 2020). Este tipo de eventos trae consigo amenazas a la sostenibilidad de las actividades económicas y sociales de la ciudad y su entorno.



Figura 1: Vista urbana de Puerto Natales (Fuente: Municipalidad de Natales)

3.4. Marco normativo de los servicios sanitarios y proyectos de desalinización en Chile

La búsqueda de soluciones para asegurar la continuidad y calidad de suministro de agua a la ciudad de Puerto Natales y sus alrededores, debe ajustarse a la normativa vigente de los servicios sanitarios que rigen su prestación en Chile y a las exigencias técnicas, ambientales y administrativas asociadas al desarrollo de este tipo de proyectos.

El marco jurídico de los servicios sanitarios en Chile está formado por un conjunto de normas que regulan la provisión de agua potable y el sistema de recolección y tratamiento de aguas servidas en áreas urbanas. Estos servicios son prestados principalmente por empresas privadas bajo un régimen de concesiones otorgadas por el Estado, y están sujetas a regulación y fiscalización por parte de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), organismo que se encarga de proponer el otorgamiento y ampliación de concesiones, definir las tarifas máximas aplicables y resolver los reclamos de los usuarios, entre otras funciones, según el Compendio Normativo de los Servicios Sanitarios - Agua Potable y Saneamiento (2018).

A continuación, se listan las principales normas que se consideran de cumplimiento obligatorio para la prestación de servicios sanitarios en Chile:

Tabla 1: Normas relacionadas con la producción y distribución de agua potable en Chile. (Fuente: Compendio normativo de los servicios sanitarios)

Normativa	**Número**	**Año**	**Título**
NCh	409/1	2005	Agua Potable – Parte 1: Requisitos
NCh	409/2	2004	Agua Potable – Parte 2: Muestreo
NCh	691	1998	Agua Potable – Conducción, regulación y distribución
NCh	692	2000	Agua Potable – Plantas elevadoras – Especificaciones generales
NCh	777/1	2000	Agua Potable – Fuentes de abastecimiento y obras de captación – Parte 1: Terminología, clasificación y requisitos generales
NCh	1333	1987	Requisitos de calidad del agua para diferentes usos

Además del cumplimiento de la normativa técnica aplicable a la producción y distribución de agua potable, la disponibilidad del recurso hídrico se encuentra condicionada por el régimen de derechos de aprovechamiento de aguas, regulado por el Código de Aguas y administrado por la Dirección General de Aguas (DGA). En este contexto, la existencia de infraestructura adecuada y el cumplimiento normativo no aseguran por sí solos la disponibilidad efectiva del recurso, en especial en cuencas con restricciones de caudal, sobreotorgamiento de derechos o exigencias de caudal ecológico, aspectos que resultan determinantes para la planificación y sostenibilidad de los sistemas de abastecimiento.

Los proyectos de desalación de agua de mar en Chile, por su parte, se encuentran regulados por un marco normativo ambiental y sectorial que no contempla una tipología específica para plantas desalinizadoras en la Ley N°19.300, sino que evalúa sus partes, obras y acciones de manera indirecta a través del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). En particular, estos proyectos ingresan al SEIA cuando consideran obras como emisarios submarinos para la descarga de efluentes, tipificados en el artículo 3° del reglamento, así como sistemas de captación o conducción de agua potable, dependiendo del uso del agua producida.

En este contexto, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) ha desarrollado guías técnicas que orientan la descripción y evaluación de proyectos de desalinización, destacando la Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA (2023) y la Guía para la predicción y evaluación de impactos en ecosistemas marinos (2024). Estas guías establecen criterios para caracterizar etapas clave del proceso, tales como la captación de agua de mar, el pretratamiento, la producción de agua desalinizada —principalmente mediante ósmosis inversa—, el postratamiento, la conducción del agua producida y la descarga de salmuera al medio marino, siendo esta última uno de los aspectos ambientales más relevantes en la evaluación de impacto.

Adicionalmente, el marco regulatorio contempla normas de emisión aplicables a descargas de residuos líquidos, como el Decreto Supremo N°90/2000 (2000), así como una serie de permisos, derechos y concesiones sectoriales necesarios para la ejecución de estos proyectos. Entre ellos destacan la obtención de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA), concesiones marítimas para el uso del borde costero, permisos ambientales sectoriales, autorizaciones sanitarias y permisos municipales, los cuales pueden representar plazos significativos de tramitación y desafíos relevantes para la implementación de plantas desalinizadoras. La ausencia de una concesión específica para la actividad de desalinización refuerza la necesidad de articular estos proyectos a partir de un conjunto diverso

de instrumentos normativos y administrativos vigentes (ACADES, s.f.). Las referencias anteriores de los cuerpos legales y reglamentos, se levantan como antecedentes para la identificación de las principales fuentes alternativas que se analizan en el presente estudio.

4. Metodología

La metodología con la que se desarrolla el estudio se divide en cuatro etapas, las cuales se subdividen, a su vez, en actividades orientadas a alcanzar cada uno de los objetivos.

- Primera etapa: Estudio de las fuentes de agua y proyección de demanda de agua de la localidad.
- Segunda etapa: Diseño y dimensionamiento preliminar de los sistemas de producción.
- Tercera etapa: Estimación de costos de inversión, operación y mantenimiento de las obras, e impacto tarifario.
- Cuarta etapa: Análisis de los resultados, propuestas y conclusiones.

Lo anterior, se resume en el diagrama de flujo del diseño metodológico a continuación.

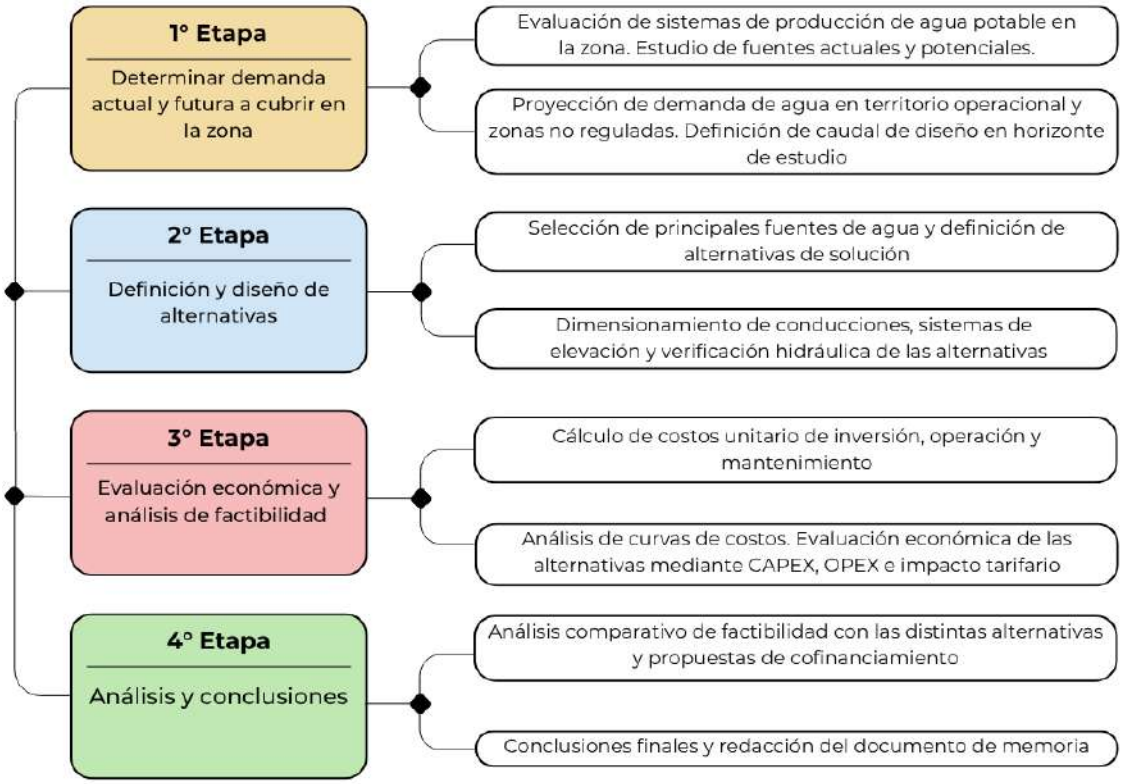


Figura 2: Diagrama de flujo del diseño metodológico (Fuente propia)

5. Escenarios de demanda

Para la proyección de demanda del estudio tarifario se tomaron los datos del plan de desarrollo de Aguas Magallanes S.A. Para esto, se consideró un horizonte de diseño al año 2050, contando como año base el 2020, coincidiendo con el año de inicio del plan de desarrollo. Se optó por este horizonte de diseño ya que se requerirán grandes inversiones para ejecutar las obras, y se pretende que sea una solución a largo plazo, por lo que un rango de 30 años resulta razonable para permitir evaluar los costos necesarios y recuperar estas inversiones en las distintas fórmulas de financiamiento.

Se realizaron dos proyecciones, uno para la demanda urbana y otro para la demanda rural, este último debido que se quiere incorporar zonas no reguladas, las cuales potencialmente se pueden incorporar al territorio operacional de la empresa prestadora de servicios Aguas Magallanes S.A.,y de esta manera, abastecer de agua potable a sectores donde es de difícil acceso llegar con este recurso. En específico, la zona no regulada que se estudió es Huertos Familiares, zona la cual corresponde mayoritariamente a parcelaciones y terrenos agrícolas, donde sus habitantes actualmente se abastecen de agua potable a través de camiones aljibes (Escenarios Hídricos 2030, 2025).

Para la proyección de demanda urbana, se utilizó como base el plan de desarrollo de la empresa Aguas Magallanes, el cual presenta estimaciones hasta el año 2035. A partir de este documento, se proyectó el crecimiento del número de clientes - como se muestra en las Figura 3 - asumiendo una tendencia lineal. Asimismo, se consideró que los nuevos clientes presentan una dotación inferior a la de los clientes históricos, lo que se refleja en los niveles de facturación.

Posteriormente, estos valores fueron convertidos a caudales máximos demandados por la ciudad, mediante la aplicación de los factores de consumo indicados en la Tabla 2. Finalmente, la proyección se extendió hasta el año 2050, obteniendo así la demanda de agua potable para el horizonte de diseño, correspondiente a un caudal máximo diario de producción de **145 [L/s]**. Las ecuaciones empleadas en estos cálculos se presentan en el Anexo.

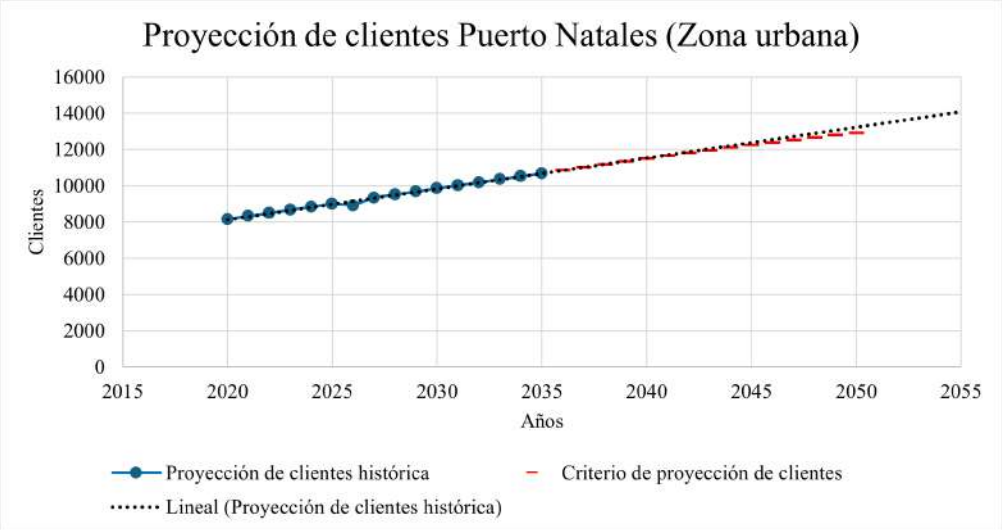


Figura 3: Proyección de clientes en la zona urbana de Puerto Natales (Fuente propia)

Tabla 2: Factores de consumo (Fuente: Aguas Magallanes S.A.)

Factor	Valor
CMMC	1.12
CDMC	1.10
FDMC	1.232
FHMC	1.50

Para la proyección de demanda rural, se estudió el sector de Huertos Familiares. Primero se estimó el número de clientes hasta el año 2035 a partir del estudio de agua potable rural (APR) desarrollado por la Asociación Nacional de Empresas de Servicios Sanitarios (2018), del cual se obtuvo la cantidad de arranques existentes en el sector. Para la proyección de demanda se adoptó los datos del plan de desarrollo de Aguas Magallanes S.A., y se estimó la proyección de clientes con una tendencia lineal hacia el año 2050, como se muestra en la Figura 4. Como resultado, se obtuvo un valor de caudal máximo diario de producción para el año 2050 de **5 [L/s]**.

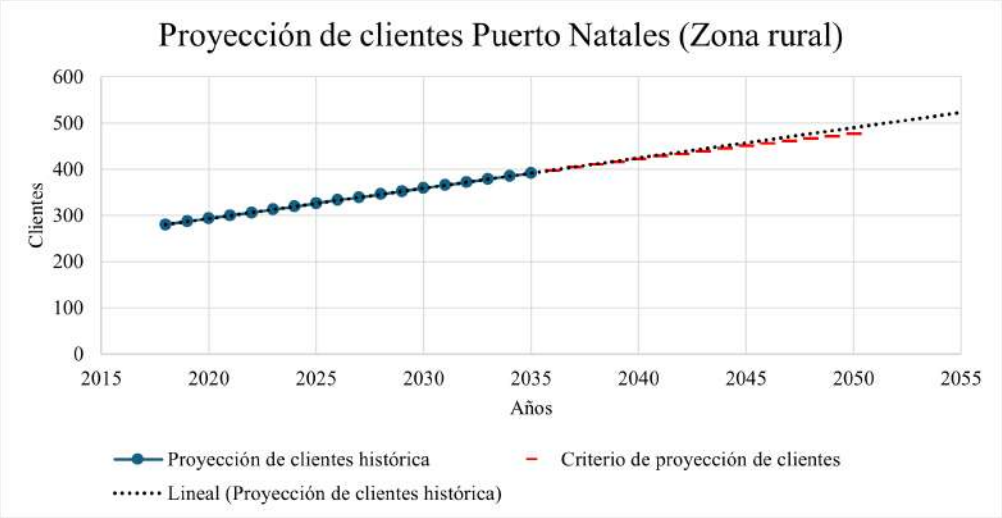


Figura 4: Proyección de clientes en la zona rural de Puerto Natales (Fuente propia)

En total, la suma de la demanda del sector urbano de la comuna de Puerto Natales y el sector rural no regulado de Huertos Familiares, es de **150 [L/s]** para el año 2050.

Para abordar esta demanda, se consideran dos alternativas generales. La primera consiste en incorporar una fuente complementaria que aporte aproximadamente **50 [L/s]**, teniendo en cuenta que el estero Dumestre presenta actualmente caudales del orden de **100 [L/s]** en periodo estival. La segunda alternativa corresponde al dimensionamiento de un sistema capaz de cubrir la totalidad de la demanda proyectada, considerando escenarios críticos como los ocurridos en 2017, en los cuales dicha fuente podría quedar completamente inhabilitada.

Dado que las soluciones implican obras de gran longitud y envergadura, y considerando además la vulnerabilidad del estero Dumestre frente a eventos asociados al cambio climático -como episodios de alta turbiedad y color que afectan su operatividad-, se opta por la segunda alternativa. En

consecuencia, el presente estudio se desarrolla sobre la base de fuentes alternativas capaces de satisfacer la totalidad de la demanda, manteniendo al estero Dumestre como un sistema de respaldo, con una **capacidad total de 150 [L/s]**.

6. Dimensionamiento y diseño de las soluciones

6.1. Análisis de fuentes alternativas

El análisis se inicia con la identificación de las potenciales fuentes de agua cercanas a la comuna de Puerto Natales, sean ríos, lagos o ambiente marino, a través de información recopilada de distintas instituciones (Aguas Magallanes S.A., 2021; Cañete et al., 2001; DGA, MOP, n.d.), y con la cuantificación del agua requerida para abastecer la población de interés, la cual fue mencionada en el punto anterior.

A partir de esto, se generó un listado de puntos desde donde se podría potencialmente extraer agua, integrando criterios y condiciones como, la distancia a la ciudad de Puerto Natales, su calidad de agua y el tratamiento que se le debe aplicar, y el método para extraer el agua. Con respecto a la ubicación, se busca que sean fuentes de agua cercanas a Puerto Natales, a no más de 30 [km] de distancia de ella, ya que esto es un factor clave para el dimensionamiento y los costos que resulten de las obras. Con respecto a su calidad y tratamiento de agua, se privilegia que permita diseñar sistemas de tratamiento eficientes.

Con respecto al método de captación de agua, se prioriza que sean fuentes de fácil acceso, que se puedan conectar a la ciudad idealmente a través de bien nacional de uso público y que se puedan transportar a través de sistemas de conducciones y materiales que estén en el mercado. Según estos criterios las fuentes de agua seleccionadas fueron: laguna Sofía, rio Hollemberg, y la desalación de agua de mar, la cual se evalúa en dos puntos, cuya ubicación general se presenta en la figura siguiente:

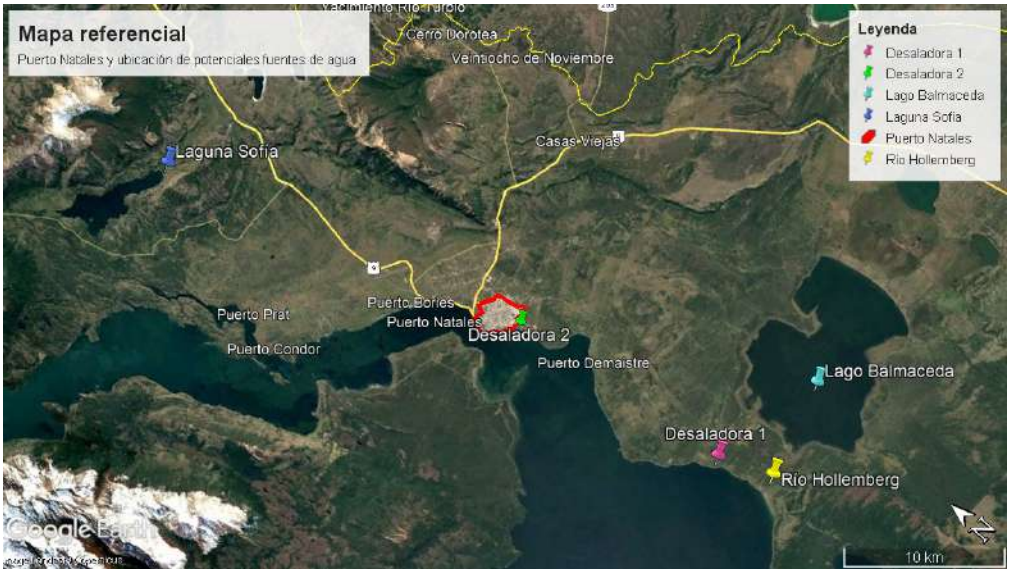


Figura 5: Mapa referencial de Puerto Natales y la ubicación de potenciales fuentes de agua. (Fuente propia)

En la Figura 5 se observa el lago Balmaceda al costado derecho, el cual fue descartado de este estudio debido a su baja profundidad, presentando en su superficie altos niveles de turbiedad, que dificultan su operación, por lo que se decidió trasladar esa captación al río Hollemberg. Se describe a continuación las principales características de cada una de las fuentes:

1. **Laguna Sofia**: Se encuentra ubicada al sur del conjunto de lagos que conforman la red léntica del Parque Nacional Torres del Paine y a 22 [km] al norte de Puerto Natales. Recibe aportes del río Rivas y de cinco chorrillos que descargan sus aguas de forma discontinua. El efluente del lago en el río Sofía. Presenta valores intermedios de conductividad, y bajos valores de color, turbidez y seston total.

   Para este caso se buscó una conducción para el caudal de diseño que vaya por bien nacional de uso público, generando dos opciones, una donde la conducción llegue directo a la planta actual de tratamiento de Puerto Natales, y otra opción donde se llegue a un sector intermedio cercano a Huerto Familiares, implementando una nueva planta de tratamiento en un sector alto de la zona, y que luego se conecte con Puerto Natales.

2. **Río Hollemberg**: La hoya del río Hollemberg se desarrolla en la XII Región de Chile, al oriente del Golfo Almirante Montt, ubicado 20 [km] al sur de Puerto Natales. Es el efluente natural del lago Balmaceda, y desagua en la bahía Desengaño de la rivera oriente del golfo. La alimentación principal la recibe del río Tranquilo. Presenta buenas condiciones y calidad de agua, y buen nivel de pH, dureza y alcalinidad.

   Para este caso se buscó una conducción para el caudal de diseño que vaya por bien nacional de uso público, llegando a la planta de tratamiento actual de Puerto Natales, extendiéndose hacia Huertos Familiares.

3. **Desaladora**: El agua de mar presenta altas concentraciones de sales, minerales y, a menudo, de metales pesados o contaminación microbiológica, por lo que no es apta para al consumo directo sin tratamiento. El principal sistema de tratamiento es la osmosis inversa, luego de un pretratamiento, el cual elimina la salinidad y contaminantes, generando agua potable.

   Para este caso se proponen dos opciones de diseño, la primera es una planta aledaña a la planta de tratamiento de aguas servidas de Puerto Natales, que plantea el reúso del emisario submarino de la planta de tratamiento, y la segunda es una planta a 15 [km] al sur de Puerto Natales, priorizando una ubicación en un sector más abierto y con mejores condiciones de dispersión de la salmuera. Luego, a partir de esta opción surgen dos escenarios de evaluación, uno con conexión a la planta actual de tratamiento y extendiéndose hacia Huertos Familiares, y otro con conexión a un sector intermedio entre Huertos Familiares y Puerto Natales, conectando y almacenando el agua a través de presurizadoras y estanques.

6.2. Dimensionamiento

El dimensionamiento fue realizado para el caudal de diseño de **150 [L/s]**, obtenido a partir de la proyección de demanda realizada hasta el año 2050, según los datos del plan de desarrollo de Aguas Magallanes S.A.

Con respecto a las cotas de terreno y los trazados, estos se hicieron a partir de *Google Earth*. Luego se extrajo la distancia longitudinal y elevación de cada trazado a través del software *QGIS*. Con esta información se construyó un perfil hidráulico para cada diseño, en donde se incluyó: la cota de terreno, la línea piezométrica, la presión interna de las tuberías y la presión admisible, para cada escenario evaluado.

Las conducciones, se predimensionaron considerando una velocidad de diseño de 1 [m/s]. Luego, se utilizó el método de Hazen- Williams para definir los diámetros mínimos y de diseño, considerando una velocidad de flujo máxima de 3[m/s], según la NCh691. En cuanto a los materiales, se adoptaron criterios basados en la presión interna de las tuberías. Se consideró el uso de acero en aquellos tramos donde la presión supera los 100 [mca], debido a su mayor resistencia mecánica y durabilidad, y por otro lado, para presiones iguales o inferiores a 100 [mca], se optó por tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE). Adicionalmente, para cada tramo se definió una presión nominal (PN), asegurando que esta sea superior a la presión representada por la línea piezométrica, con el fin de garantizar la seguridad hidráulica del sistema.

Con respecto a las plantas elevadoras, se consideró como caudal de diseño 150 [L/s] y una eficiencia de 80 %.

Por otra parte, para el análisis económico que se presenta más adelante, se consideró plantas de tratamiento de agua potable, para los diseños de laguna Sofía y río Hollemberg, y emisarios submarinos, para las desaladoras. Estas obras se diseñaron como sistemas integrados, incorporando de manera global todos sus procesos en la estimación de costos. En este contexto, los sistemas de tratamiento fueron caracterizados exclusivamente en función del caudal a tratar y del tipo de tratamiento definido para cada escenario evaluado.

Por último, para algunas de las opciones de diseño, se proyectaron estanques de regulación para el sector de Huertos Familiares. Para esto se obtuvo el volumen en [m^3] que se proyecta para el horizonte de diseño, considerando el mayor valor que resulta entre la suma del volumen de regulación y de incendio, y la suma del volumen de regulación y de reserva, según indica en la NCh691., de manera de abastecer la proyección de demanda que requiere Puerto Natales y Huertos familiares en el horizonte de diseño.

A continuación, se presenta para cada una de las alternativas una descripción general, la ubicación y trazado de la conducción con su punto de inicio y termino, el perfil hidráulico de la conducción, y una tabla resumen donde se detallan las principales variables de diseño que caracterizan cada tipo de infraestructura.

6.3. Laguna Sofía

- **Opción 1**: La conducción inicia en laguna Sofía, y se dirige hacia un punto ubicado al norponiente del sector de Huertos Familiares, a una cota aproximada de 140 [m], donde se contempla la construcción de una planta de tratamiento y la habilitación de un estanque **(tramo 1.1)**. Desde este punto, la conducción continúa hacia el sur atravesando el sector de Huerto Familiares hasta alcanzar el sector poniente de Puerto Natales **(tramo 1.2)**, donde se conecta con la red de distribución existente de la ciudad.

  Tramo 1.1

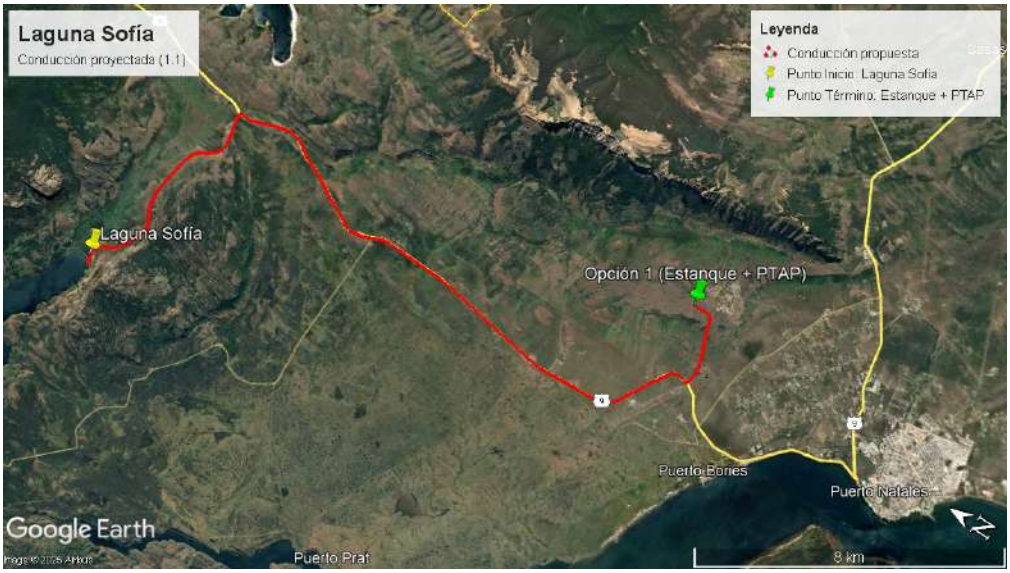


Figura 6: Trazado de conducción del tramo 1.1 (Fuente propia)

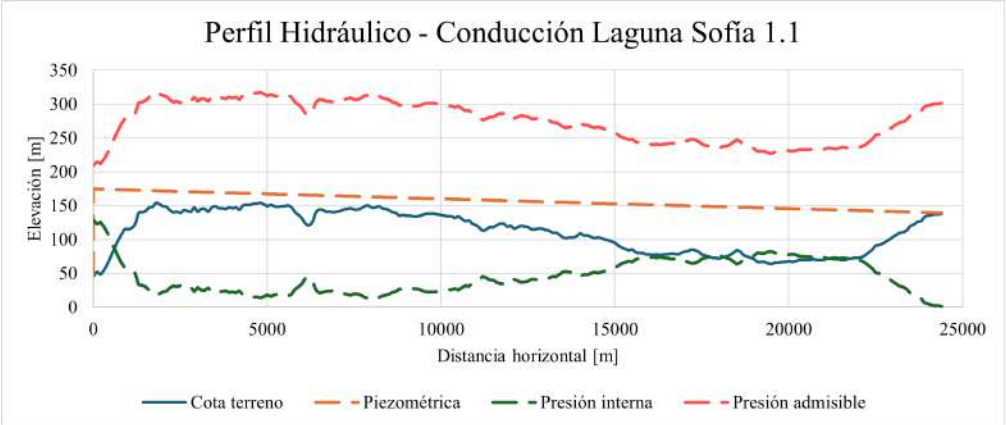


Figura 7: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 1.1 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Datos de diseño del tramo 1.1 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE / Acero
Largo [m]	24.000 / 500
Diámetro [mm]	450
PN [bar]	16
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	242
Altura manométrica, Hm [m]	130
Planta de Tratamiento	
Caudal [L/s]	150
Tipo de tratamiento	Filtración rápida
Estanque	
Volumen [m^3]	3.200

Tramo 1.2

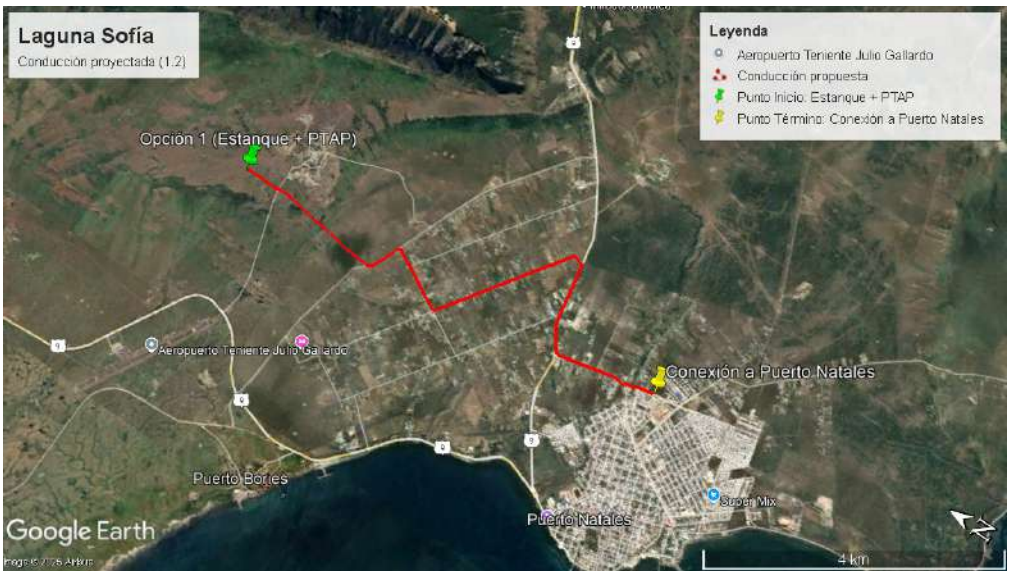


Figura 8: Trazado de conducción del tramo 1.2 (Fuente propia)

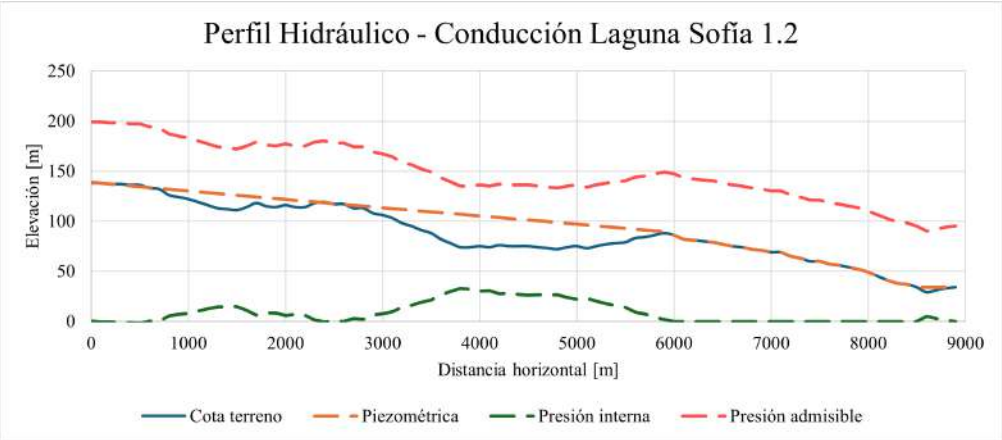


Figura 9: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 1.2 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Datos de diseño del tramo 1.2 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE
Largo [m]	9.000
Diámetro [mm]	315
PN [bar]	6

- **Opción 2**: La conducción inicia en laguna Sofía, y se dirige hacia la planta de tratamiento de agua potable existente de Puerto Natales **(tramo 2.1)**, donde se conecta con la red de distribución de la ciudad. Desde este punto, se proyecta una conducción que permite la conexión con el sector de Huertos Familiares **(tramo 2.2)**.

Tramo 2.1

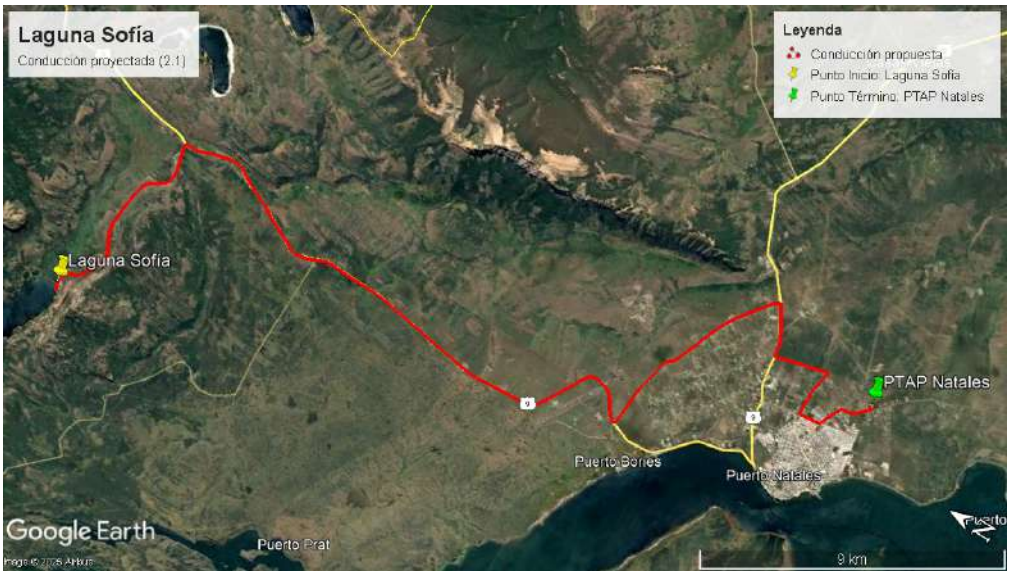


Figura 10: Trazado de conducción del tramo 2.1 (Fuente propia)

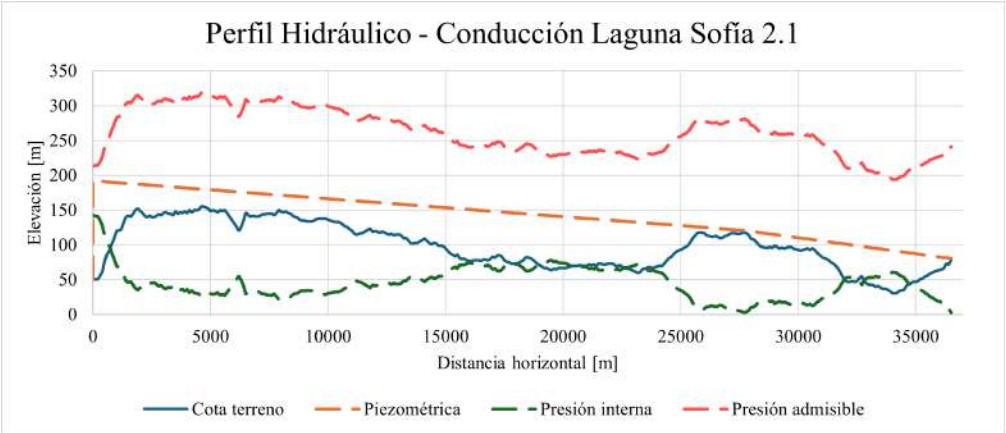


Figura 11: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 2.1 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Datos de diseño del tramo 2.1 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE / HDPE / Acero
Largo [m]	27.100 / 8.800 / 700
Diámetro [mm]	400 / 355 / 400
PN [bar]	16
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	270
Altura manométrica, Hm [m]	140

Tramo 2.2



Figura 12: Trazado de conducción del tramo 2.2 (Fuente propia)

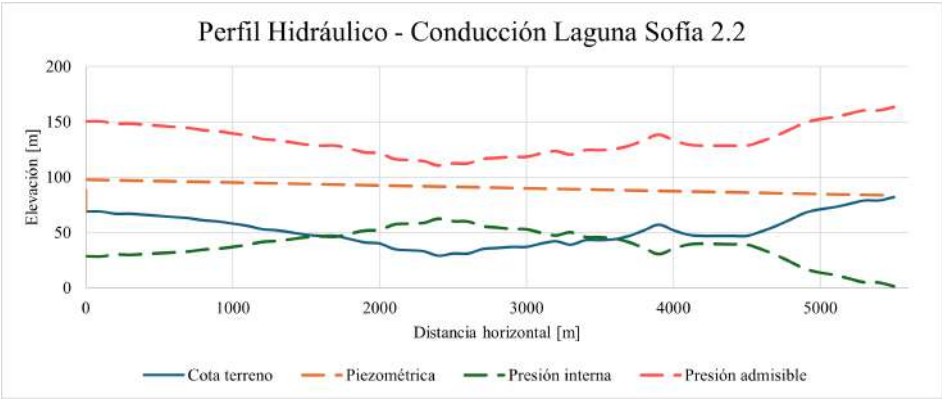


Figura 13: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 2.2(Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Datos de diseño del tramo 2.2 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE
Largo [m]	5.600
Diámetro [mm]	400
PN [bar]	8
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	55
Altura manométrica, Hm [m]	30
Planta de Tratamiento	
Caudal [L/s]	150
Tipo de tratamiento	Filtración rápida
Estanque	
Volumen [m^3]	3.200

6.4. Río Hollemberg

- La conducción inicia en el río Hollemberg y se dirige hacia el norte hasta llegar a la planta de tratamiento de agua potable existente de Puerto Natales **(tramo 1.1)**, la cual requiere ser ampliada. En este punto, se conecta con la red de distribución de la ciudad. Desde allí, se proyecta una nueva conducción que se dirige hacia el sector de Huertos Familiares **(tramo 1.2)**.

Tramo 1.1



Figura 14: Trazado de conducción del tramo 1.1 (Fuente propia)

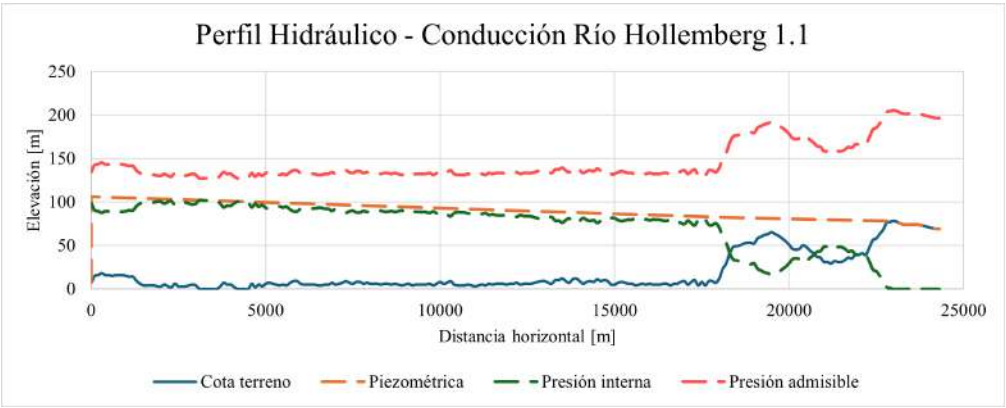


Figura 15: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 1.1 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Datos de diseño del tramo 1.1 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE / Acero
Largo [m]	5.800 / 18.600
Diámetro [mm]	500
PN [bar]	13
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	185
Altura manométrica, Hm [m]	100
Planta de Tratamiento	
Caudal [L/s]	150
Tipo de tratamiento	Filtración rápida

Tramo 1.2



Figura 16: Trazado de conducción del tramo 1.2 (Fuente propia)

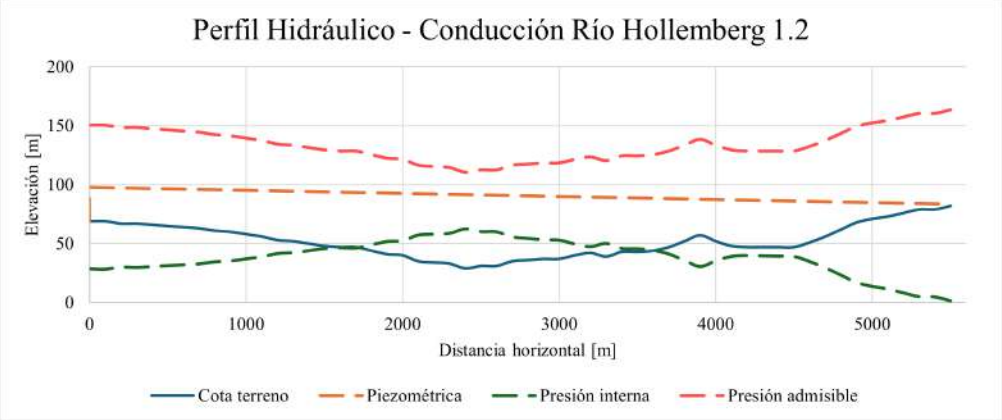


Figura 17: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 1.2 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Datos de diseño del tramo 1.2 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE
Largo [m]	5.600
Diámetro [mm]	400
PN [bar]	8
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	55
Altura manométrica, Hm [m]	30
Estanque	
Volumen [m^3]	3.200

6.5. Desalación de agua de mar

- **Opción 1**: La alternativa considera una planta desaladora con una conducción dirigida hacia el norte hasta la ciudad de Puerto Natales, conectándose a la red de distribución de la ciudad mediante una estación presurizadora **(tramo 1.1)**. Desde este punto, se proyecta una conducción hacia el sector de Huertos Familiares **(tramos 1.2)**.

Tramo 1.1



Figura 18: Trazado de conducción del tramo 1.1 (Fuente propia)

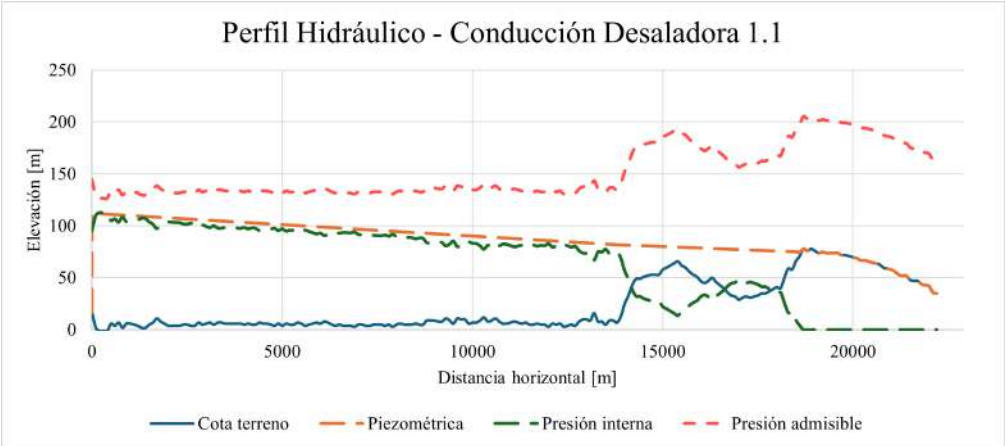


Figura 19: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 1.1 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Datos de diseño del tramo 1.1 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE / Acero
Largo [m]	8.400 / 13.900
Diámetro [mm]	450
PN [bar]	13
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	180
Altura manométrica, Hm [m]	95
Estanque	
Volumen [m^3]	3.200

Tramo 1.2



Figura 20: Trazado de conducción del tramo 1.2 (Fuente propia)

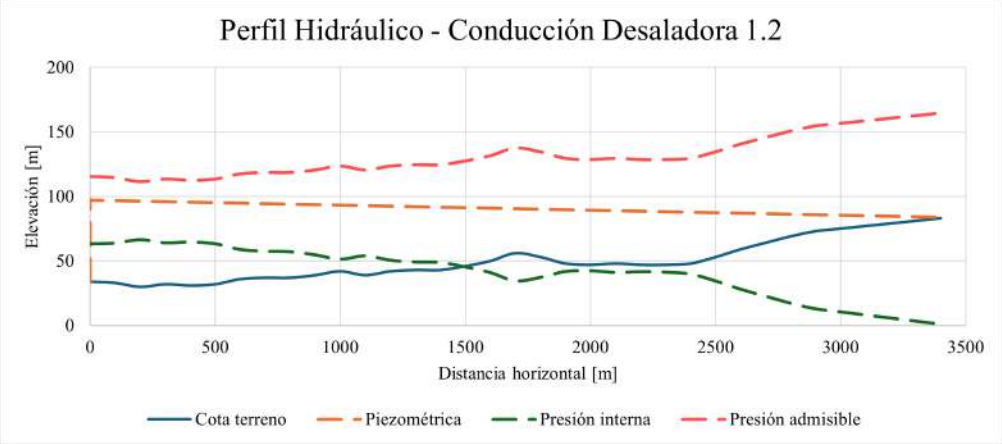


Figura 21: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 1.2 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Datos de diseño del tramo 1.2 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE
Largo [m]	3.500
Diámetro [mm]	400
PN [bar]	8
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	120
Altura manométrica, Hm [m]	64
Estanque	
Volumen [m^3]	3.200

- **Opción 2**: La alternativa considera una planta desaladora con una conducción dirigida hacia el norte hasta llegar a un estanque de cabecera, el cual se debe habilitar, ubicado en las cercanías del sector de Huerto Familiares **(tramo 2.1)**. Desde este punto, se establece la conexión con dicho sector y, posteriormente, se proyecta una conducción hacia la ciudad de Puerto Natales mediante una estación presurizadora, donde se conecta con la red de distribución de la ciudad **(tramo 2.2)**.

Tramo 2.1



Figura 22: Trazado de conducción del tramo 2.1 (Fuente propia)

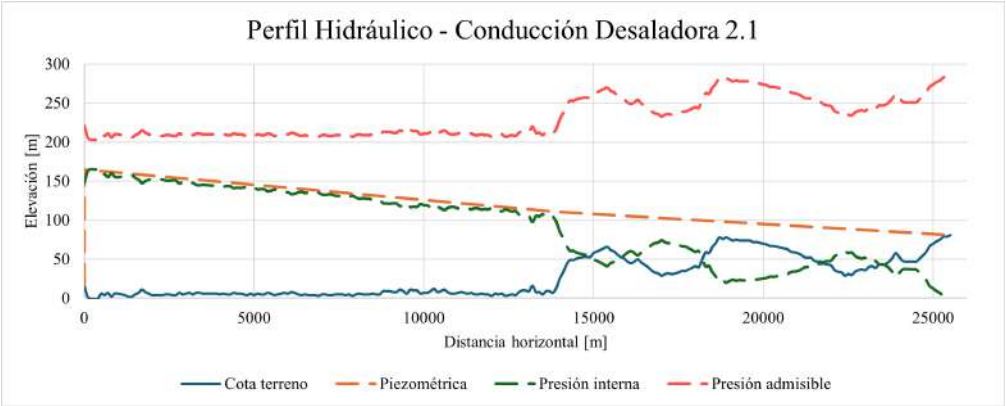


Figura 23: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 2.1 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11: Datos de diseño del tramo 2.1 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE / Acero
Largo [m]	11.600 / 14.000
Diámetro [mm]	400
PN [bar]	20
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	280
Altura manométrica, Hm [m]	150
Estanque	
Volumen [m^3]	3.200

Tramo 2.2

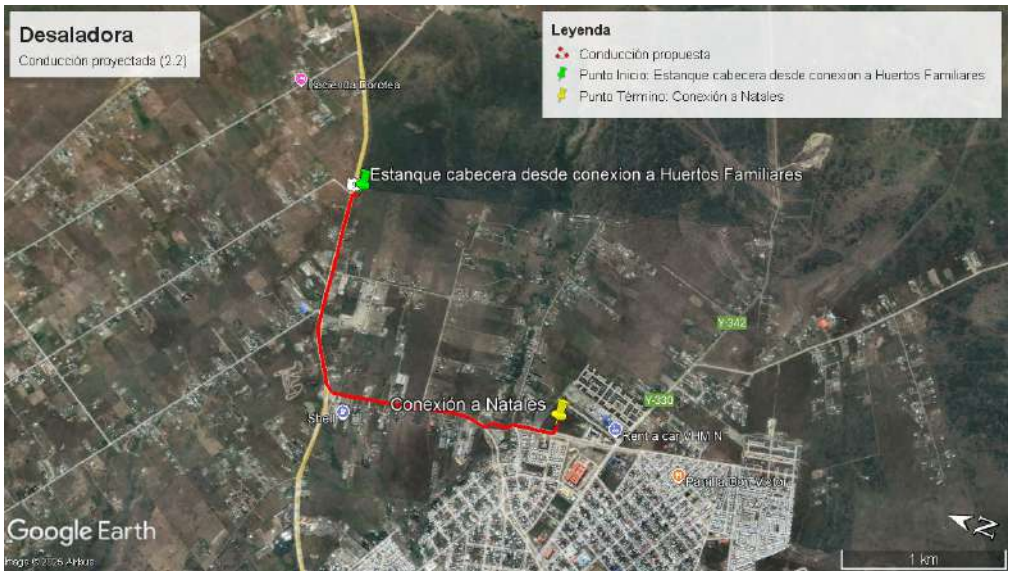


Figura 24: Trazado de conducción del tramo 2.2 (Fuente propia)

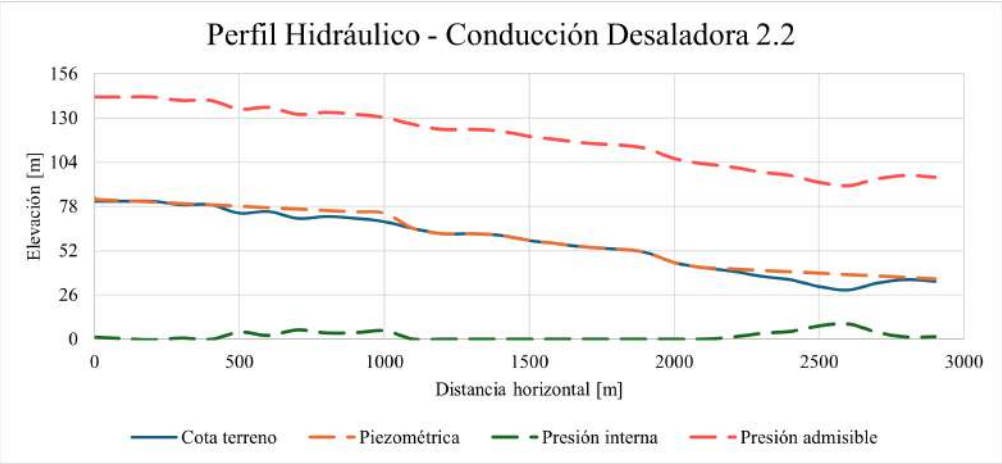


Figura 25: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 2.2 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Datos de diseño del tramo 2.2 (Fuente propia)

Conducción	
Material	HDPE
Largo [m]	3.000
Diámetro [mm]	315
PN [bar]	6

- **Opción 3**: La alternativa considera una planta desaladora ubicada en las cercanías de la planta de tratamiento de aguas servidas existente de Puerto Natales, la cual dispone de un emisario conectado a la descarga de agua tratada de dicha planta. Desde este punto, se proyecta una conducción hacia la ciudad de Puerto Natales, conectándose a la red de distribución de la ciudad **(tramo 3)**, así como una conducción hacia el sector de Huerto Familiares. Este último tramo presenta un trazado y perfil hidráulico similar al definido para el **tramo 1.2** correspondiente a la alternativa del río Hollemberg.

Tramo 3



Figura 26: Trazado de conducción del tramo 3 (Fuente propia)

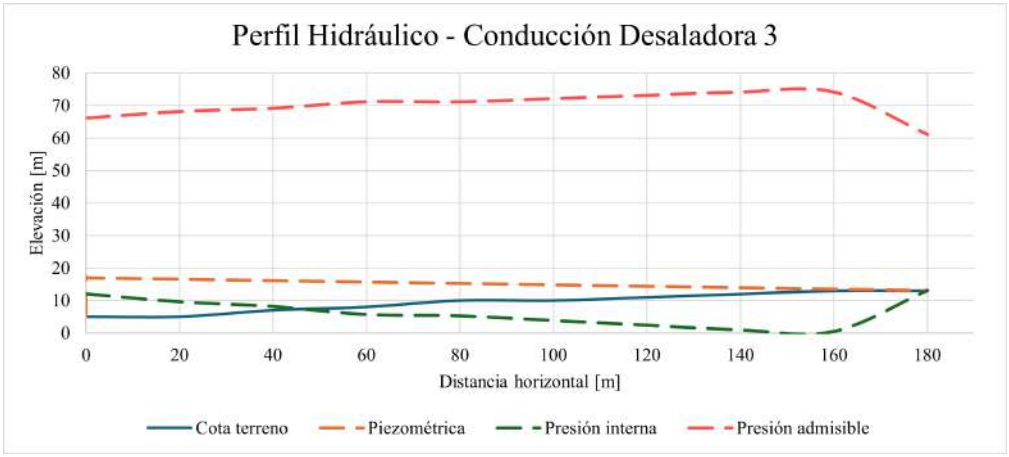


Figura 27: Perfil hidráulico de conducción para el tramo 3 (Fuente propia)

Las principales obras de infraestructura requeridas para este tramo, se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13: Datos de diseño del tramo 3 (Fuente propia)

Conducción	
Material	Acero
Largo [m]	200
Diámetro [mm]	280
PN [bar]	6
Planta Elevadora	
Potencia [kW]	23
Altura manométrica, Hm [m]	13
Estanque	
Volumen [m^3]	3.200

7. Evaluación económica e impacto tarifario

Para la evaluación económica de las alternativas levantadas se determinó los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX), hasta el horizonte del año 2050. A partir de estos antecedentes se determinó el impacto tarifario que resultaría de incorporar estas obras en los procesos de fijación de tarifas de la localidad, de acuerdo a la normativa sanitaria chilena.

7.1. Costos de inversión (CAPEX)

Para la estimación de los costos de inversión, se utilizaron curvas de costos obtenidas a partir de estudios tarifarios desarrollados por empresas sanitarias (Aguas Araucanía S.A., 2025; Aguas del Valle S.A., 2009), las que se construyeron con parámetros específicos que caracterizan cada obra. Para este estudio no se utilizó los datos del estudio tarifario de Aguas Magallanes porque tiene datos muy antiguos y se encuentran en pleno proceso de actualización. Los parámetros son los siguientes:

- Para las conducciones de acero y HDPE se obtienen a partir del largo en [m] y diámetro en [mm].
- Las plantas elevadoras se valorizan en función de la potencia instalada, que, a su vez, se calcula en función del caudal de elevación en [m^3/s] y la altura manométrica en [m].
- Los estanques a partir del volumen en [m^3].
- Las plantas de tratamiento en función del caudal, en [L/s], y del tipo de tratamiento a utilizar.
- Las desaladoras, considerando la planta y las obras marítimas, a partir de la capacidad de la planta, con el caudal en [m^3/s].

Más allá de la precisión de los valores de mercado que se podría esperar para cada obra, este criterio permite una aproximación al orden de magnitud de las obras, sin embargo, si se quiere precisar a los valores de mercado actuales, se requeriría un estudio con mayor detalle. Sin perjuicio de lo anterior, con este ejercicio se obtiene valores generales, los cuales tendrán que ser calibrados, pero permiten hacer un análisis comparativo.

Las curvas de costos adoptadas para estos cálculos se presentan en el Anexo, con los parámetros indicados en el listado anterior. Luego, la valorización de las obras levantadas para cada una de las alternativas evaluadas, se presentan en la Tabla 14, y los costos totales de la inversión por cada alternativa se presentan en la Figura 28 y en la Tabla 15.

Tabla 14: Resumen de costos de inversión de cada obra hidráulica por alternativa en MM$ (Fuente propia)

Alternativa	Obra Hidráulica	Costo [MM$]
Laguna Sofía 1	Plantas Elevadoras	14.630
	Tuberías de Acero	250
	Tuberías de HDPE	8.436
	Plantas de Tratamiento	18.478
	Estanques	632
	Total	**42.427**
Laguna Sofía 2	Plantas Elevadoras	22.731
	Tuberías de Acero	319
	Tuberías de HDPE	9.841
	Plantas de Tratamiento	18.478
	Estanques	632
	Total	**52.002**
Hollemberg	Plantas Elevadoras	19.389
	Tuberías de Acero	10.141
	Tuberías de HDPE	3.231
	Plantas de Tratamiento	18.478
	Estanques	632
	Total	**51.872**
Desaladora 1	Plantas Elevadoras	21.729
	Tuberías de Acero	6.961
	Tuberías de HDPE	3.214
	Planta y Obras Marítimas	18.073
	Estanques	1.265
	Total	**51.241**
Desaladora 2	Plantas Elevadoras	16.080
	Tuberías de Acero	6.390
	Tuberías de HDPE	3.390
	Planta y Obras Marítimas	18.073
	Estanques	632
	Total	**44.565**
Desaladora 3	Plantas Elevadoras	12.824
	Tuberías de Acero	70
	Tuberías de HDPE	1.364
	Planta y Obras Marítimas	18.073
	Estanques	1.265
	Total	**33.596**

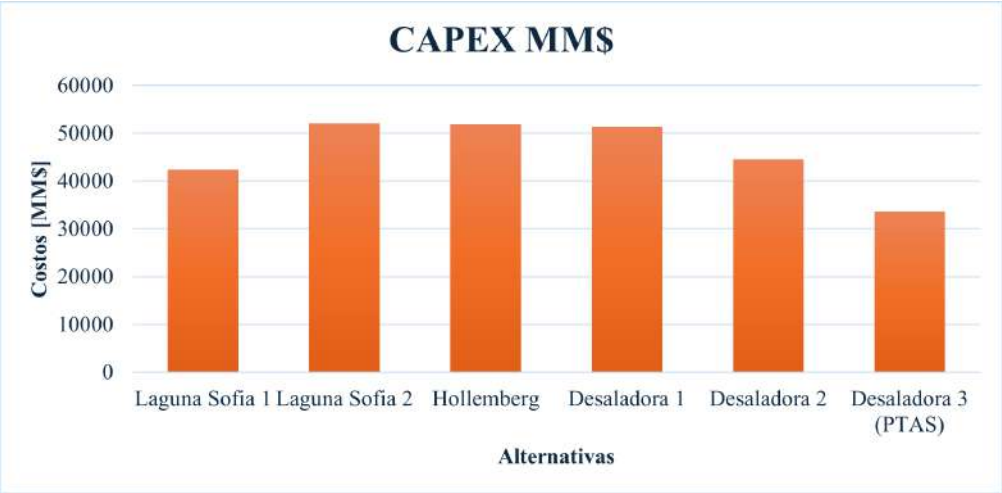


Figura 28: Resultados obtenidos de los costos de inversión en MM$ (Fuente propia)

Tabla 15: Costo total de inversión por alternativa (Fuente propia)

Alternativa	**Costo total [MM$]**
Laguna Sofía 1	42.427
Laguna Sofía 2	52.002
Hollemberg	51.872
Desaladora 1	51.241
Desaladora 2	44.565
Desaladora 3	33.596

7.2. Costos de operación (OPEX)

Para obtener los costos de operación, se consideró las 3 partidas principales: Los costos de energía de elevación, los costos de tratamiento y los costos de mantención, tanto de las obras civiles y los equipos. No se incluyeron los costos de personal ya que se asumen como parte de la operación de las empresas sanitarias.

Para la estimación de los costos de energía asociados a la elevación, se calculó la energía requerida en [kWh/año] para impulsar los volúmenes de agua proyectados en cada año del horizonte de diseño. Asimismo, se determinaron las horas de operación de los sistemas en función de los caudales y condiciones de impulsión.

Luego, se adoptó un costo unitario promedio de 132 [$/kWh], como precio monómico a partir de las tarifas de la empresa prestadora de servicios eléctricos de la zona (Empresa Eléctrica de Magallanes S.A., 2025).

En la Tabla 16 se presenta el costo de la energía en MM$, para cada alternativa. Si bien la demanda y las horas de operación varían a lo largo del horizonte de diseño, se optó por utilizar un

valor representativo, con el fin de simplificar la estimación de los costos de energía y permitir una comparación homogénea entre las distintas alternativas evaluadas.

Tabla 16: Resumen de costos de energía por alternativa (Fuente propia)

Alternativa	**Altura [m]**	**Potencia [kW]**	**Energía [kWh/año]**	**Costo anual [MM$]**
Laguna Sofía 1	129	242	2.121.548	**280**
Laguna Sofía 2	172	323	2.827.810	**373**
Hollemberg	128	240	2.103.297	**278**
Desaladora 1	159	298	2.610.573	**345**
Desaladora 2	148	278	2.435.940	**322**
Desaladora 3	41	78	680.116	**90**

Para los costos de tratamiento de las alternativas asociadas a laguna Sofía y río Hollemberg, se adoptó un costo unitario promedio de 188 [$\$/m^3$], obtenido a partir de valores reportados en estudios de Aguas Magallanes S.A..

En el caso de las alternativas de desalación, se consideró un costo unitario de 550 [$\$/m^3$], equivalente a 0,6 [US$\$/m^3$], de acuerdo con datos extraídos del Ministerio de Obras Publicas (MOP, 2021). Esta valor refleja los mayores costos asociados a los procesos de desalinización en comparación con el tratamiento convencional de agua continental. En la Tabla 17 se presentan los costos de tratamiento para cada alternativa. Para su estimación, se calculó un volumen promedio de agua a tratar a lo largo del horizonte de diseño, considerando los valores proyectados año a año. Este volumen promedio se utilizó como base para la aplicación del costo unitario, con el fin de asegurar una comparación consistente entre las distintas alternativas.

Tabla 17: Resumen de costos anuales de tratamiento por tipo de alternativa (Fuente propia)

Tipo de alternativa	**Costo anual [MM$]**
Laguna Sofía / Hollemberg	889
Desaladoras	2.606

Con respecto a los costos de mantención de las obras civiles y los equipos, se calculó un porcentaje de la inversión de cada componente, a partir de datos de gestión de activos (Tractian, s.f. UpKeep Technologies, Inc., s.f.) siendo para las obras civiles un 0,5 % y para los equipos un 2 % de la inversión, esto para el caso de los diseños de laguna Sofía y río Hollemberg. En el caso de las alternativas de desalación, los porcentajes de mantención son levemente superiores debido a que las instalaciones operan en un ambiente marino, caracterizado por su alta corrosividad. Por este motivo, se adoptó un porcentaje de 1 % para las obras civiles y un 2,5 % para los equipos. En la Tabla 18 se presentan los resultados de los costos de mantención de las obras civiles, de los equipos y de cada alternativa evaluada.

Tabla 18: Costos de mantención anual por alternativa (Fuente propia)

Alternativa	**Obras Civiles [MM$]**	**Equipos [MM$]**	**Costo anual [MM$]**
Laguna Sofía 1	129	331	**460**
Laguna Sofía 2	157	412	**569**
Hollemberg	165	379	**544**
Desaladora 1	313	498	**811**
Desaladora 2	275	427	**702**
Desaladora 3	181	386	**567**

Con el fin de evaluar de manera consistente los escenarios analizados, los costos de operación proyectados para los próximos 20 años fueron expresados en términos de valor presente, empleando una tasa de descuento del 7 %, correspondiente al valor mínimo utilizado en la determinación de tarifas de los servicios sanitarios urbanos en Chile.

Con la suma de todos estos componentes, se obtiene la recaudación anual requerida para operar y mantener cada alternativa. En la Figura 29 y la Tabla 19, se muestran los resultados para cada alternativa, en millones de pesos chilenos MM$.

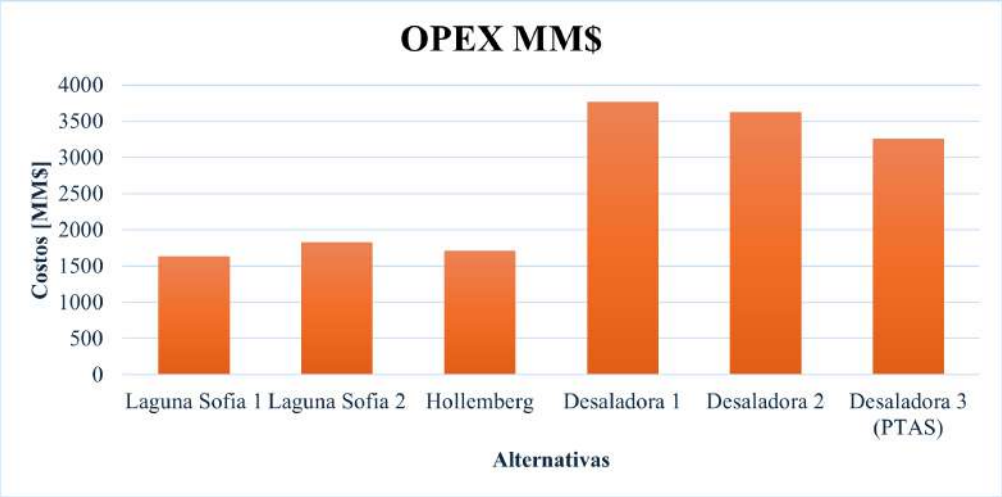


Figura 29: Resultados obtenidos de los costos de operación. (Fuente propia)

Tabla 19: Costos de operación anual por alternativa (Fuente propia)

Alternativa	**Costo anual [MM$]**
Laguna Sofía 1	1.630
Laguna Sofía 2	1.832
Hollemberg	1.710
Desaladora 1	3.761
Desaladora 2	3.629
Desaladora 3	3.263

7.3. Impacto tarifario

El sistema de cálculo de las tarifas del sector sanitario en Chile considera que la recaudación a obtener por la prestación de los servicios, debe cubrir los costos de operación eficiente y la anualidad de las inversiones requeridas. Esta anualidad se aproxima a un porcentaje de la inversión inicial, cuyos valores pueden ser deducidos de los estudios tarifarios que se han desarrollado en el sector.

Para obtener el impacto tarifario primero se aplica un porcentaje correspondiente a la anualidad de cada obra en los costos de inversión (CAPEX), lo que corresponde a un costo fijo anual equivalente de cada inversión, lo que convierte el CAPEX de cada obra en un pago anual constante durante su vida útil. Para esto, se adopta el cociente entre las inversiones y la anualidad de distintos tipos de obra, de acuerdo a las formulas tarifarias del estudio de Aguas Magallanes. En la Tabla 20 se muestra el porcentaje de anualidad de cada obra.

Tabla 20: Anualidad de cada obra. (Fuente: Aguas Magallanes S.A.)

Obra	**Anualidad (%)**
Planta Elevadora	10,98
Impulsión	9,44
Planta de Tratamiento	10,98
Estanque	9,44
Planta Desaladora	7,25

Mediante la aplicación de la anualidad a cada componente de inversión, se estimó la recaudación anual requerida para financiar cada alternativa. Para estos cálculos, se consideraron los valores de la UF y del dólar US vigentes al 4 de diciembre de 2025, equivalentes a $39.643 y $918, respectivamente.

Posteriormente, se integraron los costos de inversión anualizados (CAPEX) con los costos de operación promedio (OPEX), obteniéndose así la recaudación anual total requerida para cubrir ambos componentes en cada alternativa. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21: Resumen de costos totales por alternativa en MM$. (Fuente propia)

Alternativa	**Anualidad CAPEX [MM$]**	**OPEX anual [MM$/año]**	**Total [MM$]**
Laguna Sofía 1	4.515	1.630	**6.145**
Laguna Sofía 2	5.543	1.832	**7.375**
Hollemberg	5.480	1.710	**7.190**
Desaladora 1	4.775	3.761	**8.537**
Desaladora 2	4.058	3.629	**7.687**
Desaladora 3	2.972	3.263	**6.236**

Los valores listados, se comparan con los ingresos tarifarios y se calcula el impacto tarifario. Para determinarlo, se divide la recaudación anual requerida por el volumen total de agua a suministrar en el horizonte de diseño, correspondiente a **4.730.400 [m^3/año]**. De este modo, se obtiene un valor en [$/$m^3$], que representa el costo adicional que debe incorporarse a la tarifa por cada metro cúbico consumido, con el fin de financiar las obras proyectadas. Los resultados de este incremento se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22: Incremento tarifario por alternativa en [$/$m^3$]. (Fuente propia)

Alternativa	**Incremento [$/$m^3$]**
Laguna Sofía 1	1.299
Laguna Sofía 2	1.559
Hollemberg	1.520
Desaladora 1	1.805
Desaladora 2	1.625
Desaladora 3	1.318

Posteriormente, utilizando las tarifas vigentes de la empresa Aguas Magallanes S.A., mostradas en la Tabla 23, se estima el efecto de este incremento sobre una cuenta tipo de 15 [m^3]. En particular, para un consumo mensual de 15 [m^3], se obtiene un valor de cuenta de aproximadamente $33.368.

Tabla 23: Tarifas vigenteS Aguas Magallanes 2025 (Fuente: Aguas Magallanes S.A., 2025)

Tarifa	**[$/$m^3$]**
Tarifa Agua Potable	1.057
Tarifa Agua Servida	1.047
Cargo Fijo	1.808

A continuación, en la Tabla 24 se muestran los resultados obtenidos del impacto tarifario para cada una de las alternativas. La tarifa media actual y final a cubrir en [$/mes], el incremento que tendrían las cuentas de los clientes, en [$/mes], y el porcentaje de alza que presentarían las cuentas.

Tabla 24: Impacto tarifario por alternativa (Fuente propia)

Alternativa	**Tarifa Media Actual [$/mes]**	**Tarifa Media Final [$/mes]**	**Tarifa Incremental [$/mes]**	**% de alza**
Laguna Sofía 1	33.368	52.852	19.484	58 %
Laguna Sofía 2	33.368	56.754	23.386	70 %
Hollemberg	33.368	56.167	22.799	68 %
Desaladora 1	33.368	60.437	27.069	81 %
Desaladora 2	33.368	57.744	24.376	73 %
Desaladora 3	33.368	53.142	19.774	59 %

7.4. Análisis de sensibilidad

7.4.1. Impacto de la base de usuarios sobre el incremento tarifario.

El análisis de sensibilidad se emplea para evaluar cómo varían los resultados tarifarios del proyecto frente a cambios en los supuestos del modelo.

En el primer escenario, el incremento tarifario se calcula solo considerando el volumen anual proyectado de Puerto Natales. Adicionalmente, se define un segundo escenario en el cual se incorpora el volumen total de las localidades abastecidas por Aguas Magallanes S.A., incluyendo Punta Arenas y Porvenir, alcanzando un total de **29.675.375 [m^3/año]**. Esto se fundamenta en que la tarifa aplicada en Puerto Natales es, en la práctica, la misma que en Punta Arenas y Porvenir, dado que todas estas localidades pertenecen a un mismo grupo tarifario. En consecuencia, se evalúa la prorrata del impacto distribuyendo la recaudación requerida sobre el conjunto de usuarios de la región. De este modo, al aumentar el volumen total facturado, el ingreso requerido por unidad de volumen disminuye, reduciendo el incremento tarifario necesario.

Luego, empleando el mismo método de la sección anterior, se obtiene el incremento de la tarifa, expresado en [$/$m^3$], representando el costo adicional que deberá cobrarse para financiar las obras. Posteriormente, a partir de las tarifas vigentes de la empresa Aguas Magallanes que se muestran en la Tabla 23, se estima el efecto de este incremento sobre una cuenta tipo de 15 [m^3], la cual tiene un valor mensual de $33.368.

En la Tabla 25, se muestra el incremento tarifario en pesos al mes [$/mes] de ambos escenarios y la diferencia que hay entre ellos, para una cuenta tipo de 15 [m^3].

Tabla 25: Comparación de tarifas incrementales entre ambos escenarios en [$/mes] (Fuente propia)

Alternativa	**Tarifa incremental Solo Puerto Natales [$/mes]**	**Tarifa incremental Todo AMA [$/mes]**	**Diferencia [$/mes]**
Laguna Sofía 1	19.484	3.106	16.378
Laguna Sofía 2	23.386	3.728	19.658
Hollemberg	22.799	3.634	19.165
Desaladora 1	27.069	4.315	22.754
Desaladora 2	24.376	3.886	20.490
Desaladora 3	19.774	3.152	16.622

En la Tabla 26, se muestra el porcentaje de alza de la tarifa del escenario donde se considera la totalidad de Aguas Magallanes S.A y del escenario donde solo se considera Puerto Natales, para una cuenta tipo de 15 $[m^3]$.

Tabla 26: Comparación del porcentaje de alza tarifaria entre ambos escenarios (Fuente propia)

Alternativa	**Alza tarifaria Solo Puerto Natales [%]**	**Alza tarifaria Todo AMA [%]**
Laguna Sofía 1	58 %	9 %
Laguna Sofía 2	70 %	11 %
Hollemberg	68 %	11 %
Desaladora 1	81 %	13 %
Desaladora 2	73 %	12 %
Desaladora 3	59 %	9 %

7.4.2. Alternativas de cofinanciamiento

Con el objetivo de evaluar alternativas que permitan reducir el impacto tarifario de los sistemas de producción diseñados, se incorpora una alternativa de cofinanaciamiento basada en el Plan Especial de Desarrollo de Zonas Extremas (PEDZE), instrumento de política pública orientado a financiar infraestructura estratégica y servicios básicos en la Región de Magallanes y la Antártida Chilena. Este plan contempla una cartera regional de inversión pública donde se incluyen proyectos de agua potable y saneamiento, entre otros, lo que lo hace pertinente para el tipo de soluciones analizadas en este estudio (Gobierno Regional de Magallanes y de la Antártica Chilena, 2025).

Dado que las alternativas diseñadas en este estudio se alinean con las tipologías priorizadas por el PEDZE, se considera como un programa potencial de apoyo al CAPEX, permitiendo que una fracción inicial sea cubierta por financiamiento regional. Para efectos de este estudio, se adopta un porcentaje de cofinanciamiento del 15 % del CAPEX, el cual se define como un valor plausible y conservador en función de la escala de inversión que impulsa este programa y usado exclusivamente como supuesto técnico de evaluación.

Cabe mencionar que para esta evaluación se usó la misma metodología que en las secciones anteriores, por lo que en esta sección se exponen unicamente los resultados finales. A continuación se muestra en la Tabla 27 la recaudación anual requerida, incluyendo el aporte del programa PEDZE de un 15 % del CAPEX.

Tabla 27: Resultados obtenidos de la recaudación anual requerida para financiar los costos de inversión y operación (Fuente propia).

Alternativa	**Costo Total [MM$]**
Laguna Sofía 1	5.467
Laguna Sofía 2	6.544
Hollemberg	6.368
Desaladora 1	7.820
Desaladora 2	7.078
Desaladora 3	5.790

En la Tabla 28, se muestra el incremento tarifario en pesos al mes [$/mes] de ambos escenarios y la diferencia que hay entre ellos, para una cuenta tipo de 15 [m^3], con aportes del estado.

Tabla 28: Comparación de tarifas incrementales entre ambos escenarios en [$/mes], considerando aportes del estado. (Fuente propia)

Alternativa	**Tarifa incremental Solo Puerto Natales [$/mes]**	**Tarifa incremental Todo AMA [$/mes]**	**Diferencia [$/mes]**
Laguna Sofía 1	17.337	2.764	14.573
Laguna Sofía 2	20.749	3.308	17.442
Hollemberg	20.193	3.219	16.974
Desaladora 1	24.798	3.953	20.845
Desaladora 2	22.446	3.578	18.868
Desaladora 3	18.360	2.927	15.433

En la Tabla 29, se muestra el porcentaje de alza de la tarifa del escenario donde se considera la totalidad de Aguas Magallanes S.A y del escenario donde solo se considera Puerto Natales, para una cuenta tipo de 15 [m^3], con aportes del estado.

Tabla 29: Comparación del porcentaje de alza tarifaria entre ambos escenarios, con aportes del estado. (Fuente propia)

Alternativa	**Alza tarifaria Solo Puerto Natales [%]**	**Alza tarifaria Todo AMA [%]**
Laguna Sofía 1	52 %	8 %
Laguna Sofía 2	62 %	10 %
Hollemberg	61 %	10 %
Desaladora 1	74 %	12 %
Desaladora 2	67 %	11 %
Desaladora 3	55 %	9 %

Sin perjuicio de lo anterior, con el objetivo de analizar distintos porcentajes de cofinanciamiento del CAPEX y justificar el nivel de subsidio en el análisis base, se evalúa el impacto de distintos niveles de financiamiento sobre el incremento tarifario.

En particular, se analiza un rango de subsidio entre 0 % y 100 % del CAPEX, para el escenario de alza aplicado a todas las localidades abastecidas por Aguas Magallanes.

La Figura 30 presenta el porcentaje de alza del incremento tarifario para cada alternativa en función del nivel de subsidio al CAPEX, permitiendo visualizar la relación entre ambas variables.

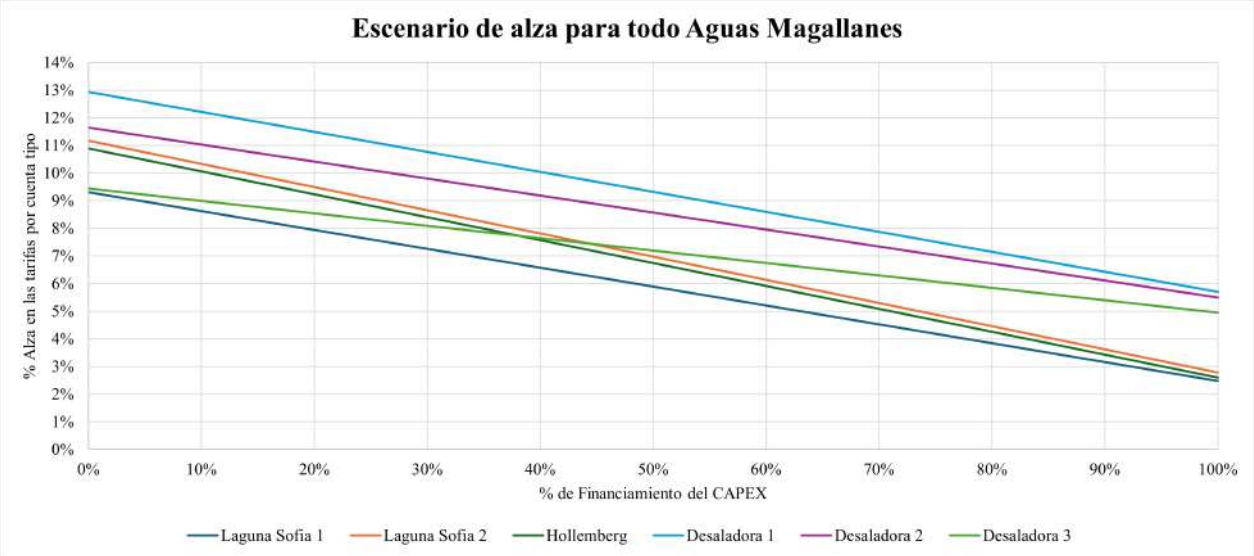


Figura 30: Resultados de la variación del incremento tarifario con respecto al nivel de subsidio del CAPEX (Fuente propia)

8. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos para las variaciones tarifarias en los distintos escenarios evaluados y en el análisis de sensibilidad, reflejan un aumento importante en las cuentas de los usuarios de agua potable en Puerto Natales, que sería, en principio, inviable si no se considera su integración tarifaria con las otras localidades de la región.

Cuando se suma la demanda con Punta Arenas y Porvenir, este aumento llega a variaciones cercanas a un 10 %, que se estima podrían ser aceptadas por los usuarios, aunque puede producirse una resistencia en los sistemas que no se ven directamente beneficiados. Sin embargo, esta aparece como la única alternativa viable en lo que respecta a la agrupación de sistemas.

Otro aspecto importante, es que las alternativas evaluadas presentan componentes de inversión y operación distintos. Mientras que las opciones de uso de agua continental, como laguna Sofía y río Hollemberg tienen una inversión mayor, las opciones de desalación presentan una incidencia mayor en los costos de operación. De hecho, desde el punto de vista de las inversiones, la mayor incidencia se observa en la longitud total de las conducciones de las opciones de agua continental, en particular en las de acero, debido a altas presiones, y, por consiguiente, en la potencia de las plantas elevadoras de estas alternativas. En otro sentido, la Desaladora 3, presenta una conducción muy corta y baja potencia de elevación, lo que reduce de manera significativa su CAPEX.

En términos numéricos, la alternativa con menor CAPEX total resulta ser la Desaladora 3 (anualidad de 2.972 MM$), seguida por la Desaladora 2 (37 % mayor) y laguna Sofía 1 (52 % mayor), mientras que las más altas inversiones se observan en las opciones de laguna Sofía 2 (86 % mayor) y río Hollemberg (84 % mayor).

Los costos de operación, por su parte, invierten el comportamiento, ya que las soluciones con fuentes continentales como laguna Sofía y río Hollemberg presentan un OPEX menor, frente a las alternativas de desalación de agua de mar, que presenta mayores costos. Así, la recaudación anual requerida para cubrir la operación, se separa en dos grandes grupos: las fuentes de agua continental, con costos cercanos a los 1.700 MM$ anuales, y las alternativas de desalación, con costos que duplican este valor.

Sumando los costos de operación, con la anualidad de las inversiones, que es el monto que debería ser cubierto por medio de las tarifas, se identifican que las mejores alternativas son la Desaladora 3 con un total 6.236 MM$ por año, y laguna Sofía 1 con 6.145 MM$ por año. En contraste, la alternativa que requeriría una mayor recaudación es la Desaladora 1 con 8.537 MM$ al año, reflejando el peor caso combinado entre operación y costos de infraestructura.

El impacto tarifario de los costos adicionales para construir y operar las obras de las alternativas evaluadas, alcanza su menor incremento en la opción de la laguna Sofía 1 con 1.299 [$\$/m^3$], si se considera sólo la base de usuarios de Puerto Natales, lo que representa un incremento de un 58 % en el costo de una cuenta tipo, y la Desaladora 3 con 1.318 [$\$/m^3$] incrementando un 59 % el costo de dicha cuenta. En el otro extremo, la Desaladora 1 representa un incremento de 81 % en el costo de la cuenta tipo. Estos valores se reducen a un incremento de un 9 % cuando se lleva a la tarifa a nivel regional, para los casos laguna Sofía 1 y Desaladora 3.

Este resultado evidencia que la incorporación de una base de usuarios más amplia permite atenuar significativamente el impacto tarifario, aunque esto implique una redistribución de los costos a nivel regional, lo cual debe ser evaluado como decisión de política pública en el marco de criterios de equidad territorial.

Por otra parte, para mitigar el impacto de estas inversiones en las tarifas de los servicios sanitarios en la región, existe la posibilidad de cofinanciar estos valores, con el uso de fondos regionales o nacionales, como ha ocurrido en otras regiones con necesidades similares, a saber, las desaladoras de Atacama y de Coquimbo.

En el ejercicio realizado, se incorporó, inicialmente, un cofinanciamiento del 15 % de CAPEX a la evaluación con la base de usuarios de toda la región. El efecto es una reducción directa de la recaudación anual requerida y, por consiguiente, de la tarifa incremental de una cuenta tipo de 15 $[m^3]$, que en todas las alternativas evaluadas hace bajar el incremento de la cuenta tipo resultante en un 1 %.

Con el nivel modelado inicialmente, se observa que el cofinanciamiento, si bien ayuda, no cambia significativamente los resultados, mantiene el orden de las opciones más competitivas, y hace que el incremento tarifario disminuya de manera marginal.

Distinto es el caso de un cofinanciamiento mayor. En estos casos, cuando se modela un 100 % de inversión de parte de terceros, distintos a la empresa sanitaria regional, el impacto del alza disminuye notablemente, e invierte las opciones, dejando siempre a la alternativa de laguna Sofía 1, como la de mejores costos, pero hace que todas las desaladoras terminen siendo opciones de mayor costo total.

Este resultado, hace pensar que las nuevas fuentes proyectadas podrían operar de una manera complementaria al suministro actual, desde el estero Dumestre. De ser así, se podría considerar que las nuevas fuentes aporten un caudal medio menor, que el modelado de 150 [L/s]. Si se disminuye esta operación a 50 y 100 [L/s] se obtendrían los siguientes resultados:

Tabla 30: Resumen de costos por alternativa en MM$ para un caudal de 50 [L/s]. (Fuente propia)

Alternativa	**CAPEX Total [MM$]**	**OPEX anual [MM$/año]**	**Total [MM$]**
Laguna Sofía 1	4.515	543	**5.058**
Laguna Sofía 2	5.543	611	**6.154**
Hollemberg	5.480	570	**6.050**
Desaladora 1	4.775	1.254	**6.029**
Desaladora 2	4.058	1.210	**5.268**
Desaladora 3	2.972	1.088	**4.060**

Tabla 31: Resumen de costos por alternativa en MM$ para un caudal de 100 [L/s]. (Fuente propia)

Alternativa	**CAPEX Total [MM$]**	**OPEX anual [MM$/año]**	**Total [MM$]**
Laguna Sofía 1	4.515	1.087	**5.601**
Laguna Sofía 2	5.543	1.221	**6.764**
Hollemberg	5.480	1.140	**6.620**
Desaladora 1	4.775	2.508	**7.283**
Desaladora 2	4.058	2.420	**6.477**
Desaladora 3	2.972	2.176	**5.148**

Se observa que, en estos escenarios, las alternativas de desalación resultan mucho más competitivas que las de fuentes continentales, ya que permiten asegurar el suministro total, y optimizan la operación, en el supuesto que el estero Dumestre podría seguir contando con un nivel de operación disponible a lo largo del año, entre 50 y 100 [L/s].

9. Conclusiones

Puerto Natales enfrenta vulnerabilidad por su dependencia a una fuente única de agua, con una capacidad limitada, y por el aumento proyectado de la demanda del sector. Bajo este contexto, evaluar fuentes complementarias con criterios técnicos, ambientales, económicos y sociales resulta necesario para sostener el desarrollo futuro de la ciudad y reducir el riesgo de interrupciones del servicio.

La evaluación técnica y económica de distintas alternativas de suministro, que provean los 150 [L/s] proyectados para el futuro de la ciudad, indica que las mejores opciones para su abastecimiento serían las de laguna Sofía 1 y la Desaladora 3, que minimizan la recaudación anual requerida para cubrir sus costos de inversión y operación. En la evaluación, laguna Sofía 1 destaca por un bajo OPEX, mientras que la Desaladora 3 destaca por su bajo CAPEX asociado a su corta conducción y ubicación favorable, aunque con un alto OPEX por el tratamiento y mantenimiento.

La variable que mejor explica las diferencias de CAPEX es la longitud de la conducción y la exigencia de materiales por presión, mientras que la variable que mejor explica las diferencias de OPEX es el costo de tratamiento, donde se ve más crítico en las desaladoras. Ambas variables deberían considerar un análisis más detallado, si se avanza en esta definición.

Todas las alternativas presentan incrementos tarifarios relevantes. La opción con mejor desempeño no puede basarse solo con el costo mínimo, sino con su capacidad de equilibrar asequibilidad, cobertura y aceptabilidad social. En este sentido, el análisis de sensibilidad muestra que el resultado tarifario requiere mantener un esquema de distribución de costos a escala regional, pero esto necesitará de sólidos sustentos en argumentos de política pública y equidad territorial.

Cabe destacar que en este estudio se incorpora la posibilidad de abastecer Huertos Familiares, lo que agrega un componente social importante, es decir, pasar de un abastecimiento precario y envejecido a una infraestructura permanente, implica mejoras en la seguridad sanitaria, continuidad del servicio y equidad territorial.

Desde el punto de vista ambiental, las alternativas de fuentes continentales y de desalinización presentan características distintas. La alternativa de laguna Sofía 1 presenta una intervención de ecosistemas terrestres y acuáticos de mayor extensión, versus la desalación que generaría impactos marinos y mayor demanda de energía. En este ámbito, la recomendación es identificar cuál impacto es más gestionable y aceptable en el contexto territorial de Magallanes y del marco ambiental aplicable.

De todas formas, resulta interesante la propuesta de la Desaladora 3, que integraría la descarga de salmuera, con el efluente de la planta de tratamiento de aguas servidas, lo que favorecería la reducción de patógenos en la descarga, al tiempo de diluir la salmuera a los niveles del agua de mar, minimizando el impacto en el emisario submarino de descarga.

Como último punto, el cofinanciamiento del CAPEX reduce la tarifa incremental y mejora la viabilidad social del proyecto, pero no altera la jerarquía principal de competitividad, donde las alternativas con mejor desempeño económico base siguen siendo las más atractivas. Por lo tanto, el cofinanciamiento se justifica como estrategia de implementación, no como criterio único de selección.

El escenario cambia de manera significativa, si se considera que el estero Dumestre sigue operando en caudales menores y acotados a su disponibilidad. En efecto, si se mantuviese una producción media de 100 [L/s], y se considera para la nueva fuente una producción menor, de 50 [L/s] promedio, la opción de la Desaladora 3 aparece como la más conveniente, con un costo incremental, que equivaldría a un aumento de un 6 % de las tarifas de la región, esto sin aportes de terceros en su cofinanciamiento.

En resumen, Puerto Natales necesita una nueva fuente confiable, para asegurar un suministro adecuado en términos de cantidad y calidad, para su demanda actual y futura, que debería incorporar los sectores de expansión, como Huertos Familiares. De las opciones evaluadas, se propone profundizar en la de laguna Sofía 1, que considera la habilitación de estanques, plantas de tratamiento y plantas elevadoras, y en la habilitación de una desaladora en el sector urbano, que utilice la misma descarga de la actual planta de tratamiento de aguas servidas de la ciudad.

En ambos casos, se debe concientizar a la comunidad, que este mayor estándar tendrá un impacto acotado en las cuentas de toda la región, cuya magnitud dependerá de las políticas de financiamiento que se tomen al respecto, pero que es necesario cubrir para darle seguridad hídrica a esta zona.

Referencias

ACADES. (2025). Declaraciones de Rafael Palacios sobre inversión en fuentes no convencionales de agua [Declaración pública citada en reporte sectorial].

ACADES. (s.f.). *Requisitos para el desarrollo de proyectos de desaladoras en Chile* (inf. téc.). ACADES. Chile.

Aguas Araucanía S.A. (2025). *Estudio tarifario para la determinación de tarifas de los servicios de agua potable y alcantarillado* (inf. téc.) (Antecedentes de costos de infraestructura sanitaria). Aguas Araucanía S.A. Chile.

Aguas del Valle S.A. (2009). *Estudio tarifario para la determinación de tarifas de los servicios de agua potable y alcantarillado* (inf. téc.) (Antecedentes de costos de infraestructura sanitaria). Aguas del Valle S.A. Chile.

Aguas Magallanes S.A. (2021). *Informe Plan de Desarrollo Puerto Natales* (Informe técnico). Aguas Magallanes S.A. Puerto Natales, Chile.

Aguas Magallanes S.A. (2025). *Tarifas vigentes de agua potable y alcantarillado (localidades de Punta Arenas, Puerto Natales y Porvenir)* (inf. téc.) (Tarifas aplicables a contar de los consumos leídos el 10 de febrero de 2025. Documento menciona los decretos Nº 19/2012, 208/2016 y 21/2021 del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo.). Aguas Magallanes S.A. Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, Chile.

Asociación Nacional de Empresas de Servicios Sanitarios. (2018). *Informe sobre Agua Potable Rural en Chile* (inf. téc.) (Informe técnico disponible en línea). ANDESS Chile.

Banco Mundial. (2022). *Entendiendo la pobreza: Agua* [Panorama general. Consultado el 25 de agosto de 2023]. https://www.worldbank.org/en/topic/water/overview

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). *El Cambio Climático y el Agua* (inf. téc.) (Documento técnico del IPCC, 224 págs.). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Ginebra.

Briceño, A., & Aníbal, J. (2023). *ATACAMA – ECONSSA Chile* (inf. téc.) (Documento técnico). ECONSSA Chile S.A. https://hdl.handle.net/11673/56111

Cañete, J. I., Gorony, M., Kuntsmann, A., Dollenz, O., Carrasco, F., Santana, M., Gallardo, M. R., Saragoni, L., Palacios, M., & Carrasco, F. (2001, abril). *Determinación de capacidad de carga del Lago Sofía en la XII Región: Informe Final (FIP 99-26)* (inf. téc.) (Contrato: Fondo de Investigación Pesquera (FIP), Subsecretaría de Pesca (Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción) y Universidad de Magallanes). Fondo de Investigación Pesquera (FIP). Punta Arenas, Chile.

DGA, MOP. (n.d.). *Sistema Hidrométrico en Línea* [Datos en línea provisorios sujetos a revisiones y/o modificaciones.]. https://dga.mop.gob.cl/sistema-hidrometrico-en-linea/

Empresa Eléctrica de Magallanes S.A. (2025). *Publicación de tarifas de suministro eléctrico* (inf. téc.) (Tarifas vigentes a contar del 1 de diciembre de 2025, conforme al DFL Nº 4 de 2006 del Ministerio de Economía). Empresa Eléctrica de Magallanes S.A. (EDELMAG). Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, Chile.

Escenarios Hídricos 2030. (2025). *Futuro Hídrico en Magallanes: Hojas de Ruta para la Resiliencia de Puerto Natales y Porvenir* (inf. téc.) (Programa Escenarios Hídricos 2030). Fundación Chile. Magallanes, Chile.

España, Ministerio de la Presidencia. (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas [8 de diciembre de 2007]. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-21092

Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012–2025. (s.f.) (Documento en PDF. En las páginas revisadas no se indica una fecha de publicación explícita (s. f.)). MOP, DGA. Chile.

Gobierno Regional de Magallanes y de la Antártica Chilena. (2025). *Presidente Boric y Gobernador Flies firman la aprobación definitiva del Plan Especial de Desarrollo de Zonas Extremas (PEDZE) 2025-2035 para Magallanes y la Antártica Chilena* [Accessed: 2025-12-28]. https://www.goremagallanes.cl/presidente-boric-y-gobernador-flies-firman-la-aprobacion-definitiva-del-plan-especial-de-desarrollo-de-zonas-extremas-pedze-2025-2035-para-magallanes-y-la-antartica-chilena/

Infiltración de acuíferos, la solución basada en la naturaleza y de bajo costo para enfrentar la escasez hídrica. (2021, 1 de julio). Escenarios Hídricos 2030. Consultado el 29 de diciembre de 2025, desde https://escenarioshidricos.cl/noticia/infiltracion-de-acuiferos-la-solucion-basada-en-la-naturaleza-y-de-bajo-costo-para-enfrentar-la-escasez-hidrica/

Koncagül, E., Connor, R., & Abete, V. (2024). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2024: Agua para la prosperidad y la paz* (inf. téc.) (Informe mundial). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380399

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2000). Decreto Supremo N90/2000: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

MOP. (2021). Desalinización como fuente del recurso hídrico [Presentación en seminario técnico del MOP sobre desalinización].

MOP. (n.d.). *Observatorio Georreferenciado* [https://snia.mop.gob.cl/observatorio/.]. https://www.mop.gob.cl/serviciosmop/observatorio-georreferenciado/

Morales Estay, P. (2022). *El sistema de tratamiento de aguas grises en Singapur* (inf. téc.) (Documento de análisis). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Municipalidad de Natales. (2019). *Plan de Desarrollo Comunal 2017-2025* (inf. téc.) (Documento institucional). Municipalidad de Natales.

Municipalidad de Natales. (2020). *Plan Regulador Comunal de Natales* (inf. téc.) (Instrumento de planificación territorial). SEREMI MINVU Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

PNUMA. (2023). *About water* [Recuperado el 28 de agosto de 2023]. https://www.unep.org/es/node/622

Santibáñez, F., Apey, A., Barrera, G. D., & Carbonell Piccardo, C. (2016). *El cambio climático y los recursos hídricos de Chile* (inf. téc.) (Estudio técnico). ODEPA. http://www.odepa.gob.cl

Servicio de Evaluación Ambiental. (2023). *Guía para la descripción de proyectos de desalinizadoras en el SEIA* (inf. téc.). Servicio de Evaluación Ambiental. Chile.

Servicio de Evaluación Ambiental. (2024). *Guía para la predicción y evaluación de impactos en ecosistemas marinos* (inf. téc.). Servicio de Evaluación Ambiental. Chile.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2018). *Compendio Normativo de los Servicios Sanitarios* (inf. téc.) (Documento normativo). Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Chile.

Tractian. (s.f.). *Cómo hacer un presupuesto de mantenimiento* [Blog técnico corporativo.]. https://tractian.com/es/blog/como-hacer-un-presupuesto-de-mantenimiento

UpKeep Technologies, Inc. (s.f.). *How to Budget for Equipment Maintenance* [Sitio web corporativo.]. https://upkeep.com/es/learning/budget-for-equipment-maintenance/

Wetzel (Ed.). (2023). *Wetzel's Limnology: Lake and River Ecosystems* (4.ª ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2019-0-04412-3

World Resources Institute. (2019). *Highest Water-Stressed Countries* [Consultado el 16 de agosto de 2023]. https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries

Zarza, L. F. (n.d.). *¿Qué son los recursos hídricos no convencionales?* iAgua. https://www.iagua.es/

A. Anexos

1. **Caudal medio de agua potable**

$$Q_m = \frac{\text{Facturación proyectada}}{365 \cdot 86400} \cdot 1000 \tag{1}$$

Donde:

- Q_m: caudal medio de agua potable [L/s].
- Facturación proyectada: volumen anual facturado [m^3/año].

2. **Caudal máximo diario**

$$Q_{md} = Q_m \cdot FDMC \tag{2}$$

Donde:

- Q_{md}: caudal máximo diario [L/s].
- Q_m: caudal medio [L/s].
- $FDMC$: Factor del día de máximo consumo.

3. **Caudal máximo horario**

$$Q_{mh} = FHMC \cdot Q_{md} \tag{3}$$

Donde:

- Q_{mh}: caudal máximo horario [L/s].
- Q_{md}: caudal máximo diario [L/s].
- $FHMC$: Factor de la hora de máximo consumo.

4. Curvas de costos de tuberías de acero

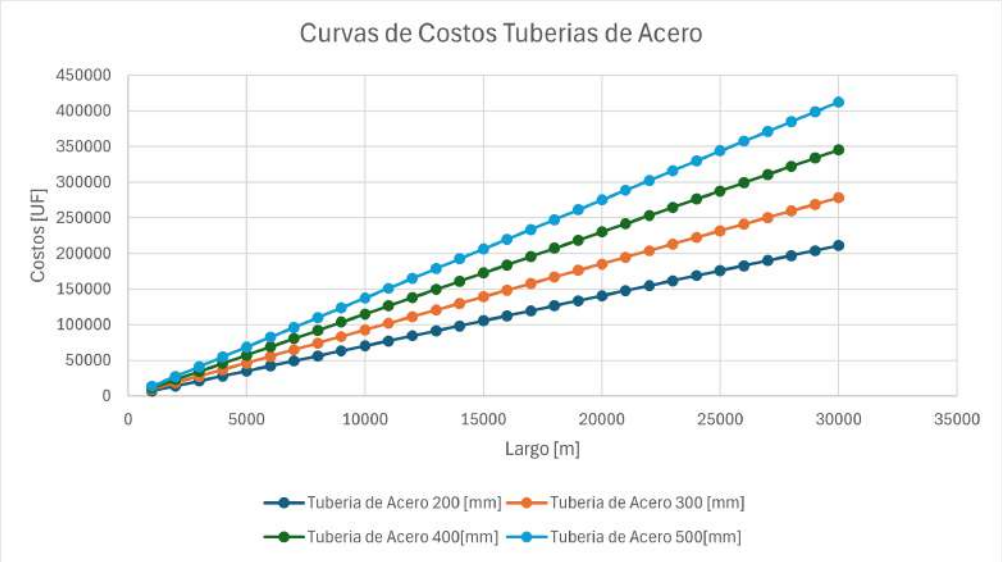


Figura 31: Curvas de costos de tuberías de acero.

5. Curvas de costos de tuberías de HDPE

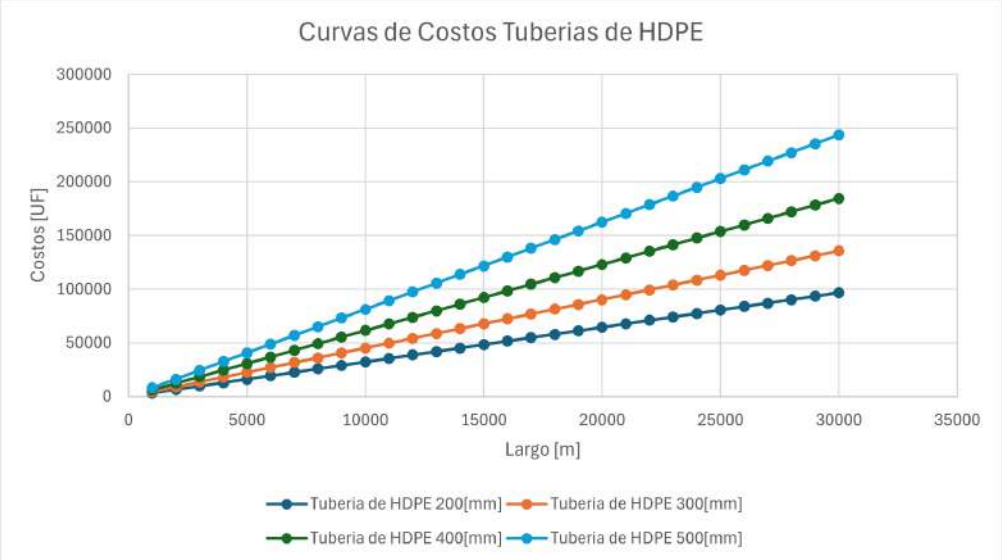


Figura 32: Curvas de costos de tuberías de HDPE.

6. Curva de costos de plantas elevadoras

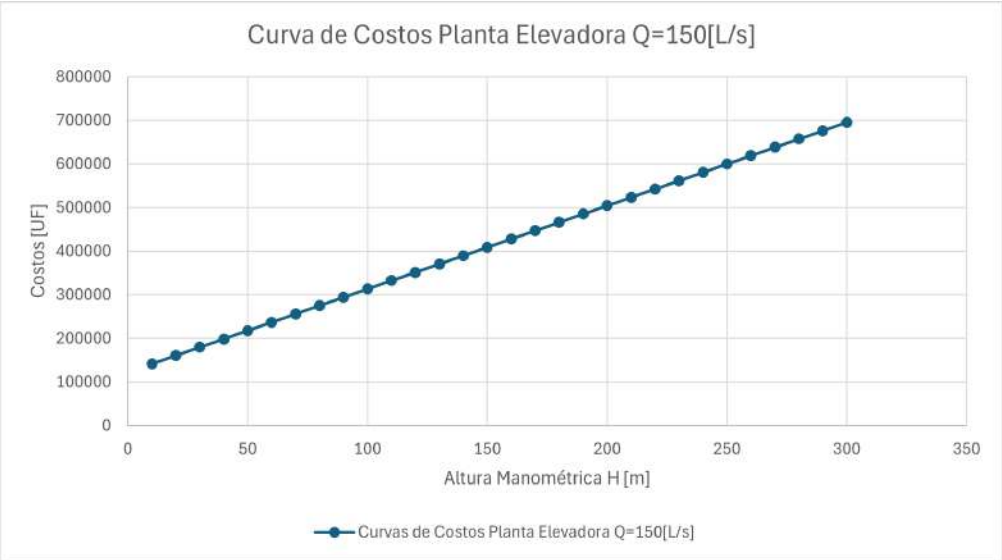


Figura 33: Curva de costos de plantas elevadoras.

7. Curva de costos de estanques

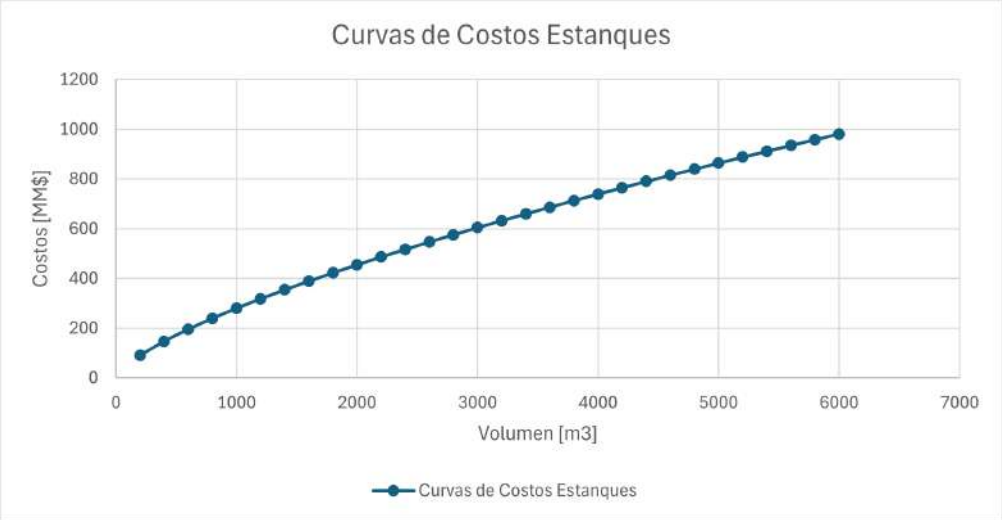


Figura 34: Curva de costos de estanques.

8. Curva de costos de plantas desaladoras

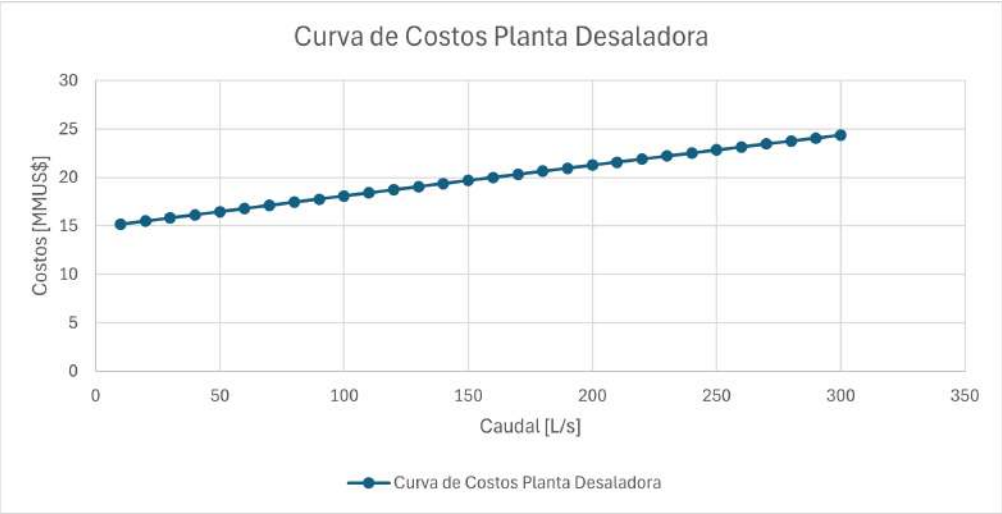


Figura 35: Curva de costos de plantas desaladoras.