

EVALUACIÓN ECONÓMICA COMPARATIVA

TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Estudio realizado en el marco del proyecto CORFO Bien Público 24BP-273014

Enero 2026

Contenido

1. Introducción 3
1.1. Análisis del contexto 3
1.2. Objetivo general y objetivos específicos de la evaluación. 5
1.3. Justificación de la necesidad del análisis comparativo. 5
2. Metodología General 7
2.1 Revisión Bibliográfica y Documental 7
2.2 Estudio de Casos Reales Gualliguaica (Lodo Activado), Huatulame (Lombrifiltro), Los Nichos (Humedal) 8
2.3 Entrevistas a Expertos y Operadores 9
2.4 Levantamiento de costos para humedal construido 10
3. Análisis Comparativo de Tecnologías 12
3.1 Criterios de Comparación 12
3.2 Resultados económicos y operacionales de las tecnologías 13
3.2.1. Sistema de Lodos Activados 13
3.2.2. Sistema de Lombrifiltro 16
3.2.3. Sistema Humedal Construido 18
4. Sistematización de resultados económicos 22
4.1 Análisis comparativo costo de Inversión (CAPEX) 23
4.2. Análisis comparativo costo de operación (OPEX) 25
4.3. Área requerida por Tecnología 27
4.3. Análisis comparativo Valor Actual de Costos (VAC) Tecnologías 29
4.4. Análisis sensibilidad Tecnologías 30
4.4.1. Variaciones en costo de la energía eléctrica 30
4.4.2. Variaciones en costos de operación y mantención 31
4.4.3. Escenario con restricciones de terreno o cambio de escala 32
4.4.4. Escenario frente a variabilidad del efluente 33
5. Conclusiones y Recomendaciones 34
5.1. Fortalezas y debilidades de cada alternativa. 34
5.2 Recomendaciones finales en base al análisis comparativo 34
6. Bibliografía 37
7. Anexos 38

1. Introducción

1.1. Análisis del contexto

Chile enfrenta desde hace más de una década un escenario de escasez hídrica estructural, particularmente acentuado en la macrozona norte y centro del país. Este fenómeno, asociado a la disminución sostenida de las precipitaciones, el aumento de las temperaturas y una mayor variabilidad climática ha generado impactos significativos en la disponibilidad de recursos hídricos para consumo humano, actividades productivas y conservación de ecosistemas. En este contexto, el cambio climático actúa como un factor amplificador de una crisis que ya no puede abordarse únicamente desde la ampliación de la oferta hídrica tradicional.

La Región de Coquimbo constituye uno de los territorios más afectados por este escenario. La prolongada mega sequía ha tensionado de manera crítica a sectores estratégicos para el desarrollo regional, como la agricultura, la agroindustria, el turismo, los servicios sanitarios rurales y las comunidades locales. Esta situación ha sido reconocida de manera explícita en instrumentos de planificación regional, posicionando la gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico como un eje prioritario para la resiliencia territorial (GORE Coquimbo, 2023).

En particular, el Plan de Acción Regional de Cambio Climático (PARCC) de la Región de Coquimbo identifica al agua como un componente crítico, destacando la necesidad de avanzar en medidas de adaptación que incluyan la reutilización de aguas residuales tratadas, el fortalecimiento de capacidades técnicas y la incorporación de soluciones innovadoras y basadas en la naturaleza. De igual forma, la Estrategia Regional de Desarrollo (ERD) plantea la urgencia de diversificar las fuentes hídricas, reducir la presión sobre aguas superficiales y subterráneas, y promover modelos de desarrollo más sostenibles y resilientes frente al cambio climático (GORE Coquimbo, 2023).

A nivel nacional, Chile cuenta con normativa relevante asociada al tratamiento y descarga de aguas residuales, destacando el Decreto Supremo N°90, que regula las descargas de residuos líquidos a cuerpos de agua superficiales y marinos. Sin embargo, el marco normativo específico para el reúso de aguas residuales tratadas es reciente y presenta importantes desafíos para su implementación práctica.

La Ley N°21.075 sobre reutilización de aguas grises constituye un avance en esta materia, aunque su aplicación se ha concentrado principalmente en proyectos nuevos y de pequeña escala, limitando su impacto en la reconversión de infraestructuras existentes. En este contexto, normas técnicas como la NCh 1.333, que define requisitos de calidad del agua según distintos usos, han adquirido relevancia como referencia técnica para evaluar la viabilidad del reúso, especialmente en usos productivos como el riego.

Este escenario normativo genera tanto oportunidades como barreras, reforzando la necesidad de contar con información técnica y económica que permita evaluar soluciones de tratamiento y reúso ajustadas a las condiciones territoriales y regulatorias.

En la Región de Coquimbo existen experiencias relevantes de tratamiento de aguas residuales, tanto en el ámbito comunitario como productivo. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran las plantas de lodos activados, ampliamente implementadas en sistemas sanitarios rurales y plantas de mayor escala, así como los lombrifiltros, que han sido adoptados como soluciones de menor complejidad operativa en contextos rurales específicos (SUBDERE, 2018)

En el sector productivo, particularmente en la industria pisquera, se han desarrollado soluciones propias para el manejo de residuos líquidos industriales, principalmente en empresas de mayor tamaño. No obstante, estas alternativas suelen presentar altos costos de inversión y operación, además de requerir capacidades técnicas especializadas que no siempre están disponibles en empresas pequeñas, medianas o en organizaciones comunitarias.

En este contexto, los humedales construidos emergen como una alternativa complementaria, especialmente adecuada para escalas pequeñas y medianas y para territorios rurales. Estas soluciones, clasificadas como Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), utilizan procesos físicos, químicos y biológicos para la remoción de contaminantes, destacando por su bajo consumo energético, menores costos de operación y una gestión más sencilla en comparación con tecnologías convencionales.

Diversos estudios han demostrado su efectividad para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, así como su potencial para el reúso en riego y otros usos productivos, siempre que se encuentren adecuadamente diseñados y operados. Sin embargo, su adopción a mayor escala en Chile ha sido limitada, principalmente por la falta de experiencias demostrativas validadas en contextos locales.

A pesar del creciente interés por los humedales construidos y otras tecnologías de tratamiento, persiste una brecha relevante de evidencia técnica y económica sistematizada a nivel territorial, particularmente en la Región de Coquimbo. Si bien existe literatura nacional e internacional, la toma de decisiones a nivel regional requiere información contextualizada que considere condiciones locales, escalas reales de operación, costos efectivos de inversión (CAPEX), costos de operación y mantención (OPEX), y restricciones normativas y de gestión.

En este escenario, la presente Evaluación Económica Comparativa busca generar información técnica y económica robusta, contrastando antecedentes teóricos provenientes de la literatura especializada con evidencia empírica derivada de casos reales y pilotos implementados en la región, incluyendo humedales construidos, plantas de lodos activados y sistemas de lombrifiltro. Los resultados del estudio se proponen como un aporte concreto a la toma de decisiones, tanto para actores públicos como privados, facilitando la evaluación de alternativas tecnológicas para el tratamiento y reúso del agua en un contexto de creciente escasez hídrica.

1.2. Objetivo general y objetivos específicos de la evaluación.

- Objetivo General

Realizar un análisis económico comparativo entre tres tecnologías de tratamiento de aguas residuales —humedales construidos, lombrifiltros y plantas de lodos activados— considerando su aplicabilidad en la Región de Coquimbo, con el propósito de aportar información técnica y económica que oriente la toma de decisiones en materia de gestión y reutilización del recurso hídrico.

- Objetivos Específicos

a) Recopilar y sistematizar evidencia bibliográfica y técnica nacional e internacional sobre las tecnologías seleccionadas, que permita establecer una base comparativa respecto de sus costos de inversión, operación, eficiencia y escalabilidad.
b) Levantar información de casos reales de aplicación de las tres tecnologías en la Región de Coquimbo, mediante entrevistas, visitas técnicas y recopilación de antecedentes de operación y mantenimiento.
c) Analizar y contrastar la información teórica y empírica obtenida, identificando los principales factores técnicos, económicos y de gestión que inciden en la viabilidad de cada alternativa, y determinar los principales resultados económicos para cada una de las tecnologías evaluadas.
d) Identificar oportunidades y limitaciones para la implementación de humedales construidos como alternativa sustentable en contextos rurales y productivos de la Región de Coquimbo, contribuyendo a su validación técnica y económica a partir de la comparación con otras tecnologías existentes.

1.3. Justificación de la necesidad del análisis comparativo.

La Región de Coquimbo enfrenta un escenario de escasez hídrica estructural, reconocido tanto a nivel nacional como regional, que ha impactado de manera directa la disponibilidad del recurso hídrico para el consumo humano, la producción agrícola, la agroindustria, el turismo y otras actividades económicas relevantes. Este contexto se enmarca en una crisis hídrica prolongada, asociada al cambio climático, la disminución sostenida de las precipitaciones y una mayor presión sobre las fuentes superficiales y subterráneas, lo que ha sido ampliamente documentado por organismos nacionales e internacionales.

Frente a este escenario, el reúso de aguas residuales tratadas surge como una alternativa estratégica para diversificar la matriz hídrica regional y avanzar hacia un modelo de gestión más eficiente y circular del agua, alineado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible N°6 y con los lineamientos de la Estrategia Regional de Desarrollo y el Plan de Acción Regional de Cambio Climático (PARCC) de la Región de Coquimbo. No obstante, a pesar de su potencial, el reúso de aguas tratadas en Chile presenta aún limitaciones normativas, técnicas y económicas, especialmente a escala territorial y en contextos rurales y productivos de menor tamaño.

En la región, las plantas de tratamiento de aguas residuales basadas en lodos activados han sido la tecnología predominante, particularmente en el ámbito de los servicios sanitarios rurales. Sin embargo, diversos estudios y diagnósticos nacionales han evidenciado que estas soluciones presentan altos costos de inversión y operación, una elevada dependencia energética y requerimientos técnicos complejos, lo que dificulta su sostenibilidad en el tiempo cuando no existen capacidades de gestión consolidadas o recursos suficientes para su adecuada operación y mantención (SUBDERE, 2022). Esta situación ha derivado, en algunos casos, en un desempeño subóptimo de los sistemas, problemas de cumplimiento normativo y una limitada capacidad de reutilización efectiva del agua tratada.

Por otra parte, tecnologías alternativas como los lombrifiltros han sido implementadas de forma más acotada, principalmente en contextos rurales, presentando ventajas en términos de simplicidad operativa, pero con una escasa sistematización de información económica y de desempeño a nivel regional. En el sector productivo, en tanto, la experiencia en tratamiento y reúso de aguas residuales ha estado concentrada mayoritariamente en empresas de mayor tamaño, como ocurre en algunos casos de la industria pisquera, mientras que las pequeñas y medianas empresas enfrentan mayores barreras de acceso a soluciones técnica y económicamente viables.

En este contexto, los humedales construidos, en tanto Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), han sido identificados por la literatura científica como una alternativa con alto potencial para el tratamiento y reutilización de aguas residuales, especialmente en escalas pequeñas y medianas, debido a sus menores costos operacionales, menor demanda energética y mayor simplicidad de operación. Sin embargo, a nivel regional persiste una brecha significativa de evidencia técnica y económica, particularmente en lo relativo a costos reales de inversión (CAPEX), costos de operación y mantención (OPEX), desempeño en condiciones locales y comparabilidad con tecnologías convencionales.

La falta de información sistematizada y contextualizada limita la toma de decisiones por parte de actores públicos y privados, así como el diseño de políticas públicas, programas de fomento e instrumentos de financiamiento orientados al reúso del agua. En este sentido, robustecer la evidencia regional resulta clave para avanzar desde experiencias piloto o aisladas, hacia soluciones escalables y sostenibles en el tiempo.

En respuesta a esta brecha, el presente análisis económico comparativo se justifica como una herramienta necesaria para contrastar información teórica con evidencia empírica proveniente de casos reales, permitiendo evaluar de manera objetiva las ventajas, limitaciones y condiciones de implementación de humedales construidos, lombrifiltros y plantas de lodos activados en la Región de Coquimbo. De este modo, el estudio busca constituirse en un insumo técnico relevante para los tomadores de decisión, contribuyendo a orientar futuras inversiones, procesos de transferencia tecnológica y estrategias de adaptación hídrica en un contexto de creciente escasez del recurso.

2. Metodología General

Para dar cumplimiento a los objetivos de la evaluación económica comparativa, se diseñó una metodología de enfoque mixto, que integra el análisis de información secundaria proveniente de estudios nacionales e internacionales con el levantamiento de información primaria obtenida a partir de entrevistas y estudios de casos reales en la Región de Coquimbo.

La metodología se estructuró en cuatro componentes principales:

- Revisión bibliográfica y documental,
- Estudio de casos reales de aplicación de las tecnologías analizadas,
- Entrevistas a expertos y operadores, y
- Levantamiento de información propia del proyecto, lo que permitió contrastar antecedentes teóricos con evidencia empírica y contextualizada al territorio.

Este enfoque permitió robustecer la evaluación económica, incorporando variables técnicas, operacionales y de gestión relevantes para la toma de decisiones en materia de tratamiento y reutilización de aguas residuales.

2.1 Revisión Bibliográfica y Documental

La revisión bibliográfica y documental tuvo como objetivo principal levantar información técnica y económica de referencia asociada a la implementación de distintas tecnologías de tratamiento de aguas residuales, con énfasis en costos de inversión, operación, criterios de diseño y experiencias de aplicación en contextos rurales y de pequeña escala. Esta revisión permitió establecer una base comparativa consistente para el análisis económico desarrollado posteriormente.

Como principal fuente de referencia para las tecnologías de lodos activados y lombrifiltros, se utilizó el Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural, elaborado por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE, 2018),

Este estudio entrega antecedentes de diseño, costos de inversión y operación, eficiencias de remoción, y criterios de evaluación para distintas tecnologías, estructurados bajo supuestos homogéneos que facilitan la comparación entre alternativas.

En particular, para efectos de esta evaluación, se adoptaron los valores y supuestos correspondientes a sistemas diseñados para una población equivalente de 100 personas, lo que resulta coherente con el enfoque territorial del proyecto. Si bien el estudio de SUBDERE evalúa sistemas en un rango amplio de tamaño, desde 100 hasta 3.500 personas, se optó por trabajar con la escala mínima considerada en dicho estudio, con el objetivo de evitar distorsiones asociadas a economías de escala que podrían generar desviaciones relevantes al extrapolar los costos reales del humedal del proyecto a sistemas de mayor tamaño. Este criterio permite una comparación más precisa entre tecnologías, particularmente en contextos rurales y productivos de pequeña escala.

Adicionalmente, se revisaron otras fuentes bibliográficas internacionales con el fin de contrastar y complementar la información de costos y supuestos técnicos disponibles a nivel nacional. Entre estas, destaca la publicación “Construction and operations costs of constructed wetlands treating wastewater”(2014), desarrollado en Grecia, que propone una formulación para la estimación de costos de humedales construidos en función de variables como la población equivalente, el área requerida y las características del sistema. Esta referencia resulta especialmente relevante como marco comparativo internacional, al aportar una metodología de cálculo estandarizada para este tipo de soluciones basadas en la naturaleza.

No obstante, es importante señalar que los sistemas de humedales analizados en el estudio internacional corresponden mayoritariamente a humedales construidos de flujo subsuperficial sin aireación forzada, los cuales difieren desde el punto de vista técnico y operacional del humedal implementado en el proyecto, que incorpora un sistema de aireación. En consecuencia, la información proveniente de esta fuente fue utilizada principalmente como referencia complementaria, orientada a contrastar órdenes de magnitud y tendencias generales de costos, más que como un valor directo de comparación.

De este modo, la revisión bibliográfica y documental combinó fuentes nacionales consolidadas, que aseguran consistencia metodológica y pertinencia territorial, con referencias internacionales, que permiten contextualizar la tecnología de humedales construidos dentro de un marco más amplio de experiencias y desarrollos técnicos. Este enfoque contribuyó a robustecer el análisis comparativo, reconociendo tanto las particularidades del proyecto como las diferencias inherentes entre las distintas configuraciones tecnológicas evaluadas.

2.2 Estudio de Casos Reales Gualliguaica (Lodo Activado), Huatulame (Lombrifiltro), Los Nichos (Humedal)

Con el objetivo de complementar la información bibliográfica y contextualizar el análisis económico a las condiciones reales de implementación en la Región de Coquimbo, se desarrolló un levantamiento de casos reales representativos de distintas tecnologías de tratamiento de aguas residuales, considerando tanto servicios sanitarios rurales como aplicaciones en contextos productivos.

La selección de los casos respondió a criterios de representatividad tecnológica, diversidad de escalas, y distintos modelos de gestión, permitiendo capturar una visión más completa del desempeño económico y operacional de cada alternativa en condiciones reales de funcionamiento. De esta forma, el análisis no se limita a supuestos teóricos, sino que incorpora evidencia empírica levantada en terreno.

Los casos estudiados fueron los siguientes:

- APR Gualliguaica: planta de tratamiento de aguas servidas basada en la tecnología de lodos activados, representativa de soluciones convencionales implementadas en servicios sanitarios rurales, bajo la administración de un Servicio Sanitario Rural (SSR). Este caso

permite analizar una tecnología ampliamente utilizada, caracterizada por altos requerimientos energéticos y operacionales, en un contexto de gestión comunitaria.

- APR Huatulame: sistema de tratamiento mediante lombrifiltro, operado por la Municipalidad de Monte Patria, que representa una alternativa de menor complejidad tecnológica y operativa, orientada a contextos rurales y semiconcentrados. Este caso permite evaluar una tecnología con menores requerimientos de automatización, pero con desafíos específicos asociados a la gestión biológica del sistema.
- Pisquera Los Nichos: humedal depurador implementado en el marco del proyecto de Bien Público N° 24BP-273014, correspondiente a una solución basada en la naturaleza aplicada en un contexto productivo real. Este caso constituye una experiencia piloto reciente, que permite analizar el desempeño técnico y económico de los humedales construidos adaptados a condiciones locales, considerando además su potencial de escalabilidad y transferencia.

Para cada uno de los casos se recopiló información detallada relacionada con el diseño del sistema, costos de inversión (CAPEX), costos de operación y mantención (OPEX), requerimientos de personal, desempeño general del sistema y principales desafíos operacionales identificados durante su funcionamiento. Esta información fue obtenida a partir de visitas a terreno, entrevistas con operadores y revisión de antecedentes técnicos disponibles. Si es importante señalar que en casos de Gualliguaica y Huatulame, se utilizó la información entregada por los entrevistados, existiendo información no disponible o conocida.

El levantamiento de estos casos permitió disponer de datos reales y actualizados, los cuales fueron utilizados como insumo para el análisis comparativo desarrollado en las secciones posteriores, para contrastar información. Asimismo, el estudio de casos aportó una comprensión más profunda de los factores de gestión, operación y contexto institucional que influyen en el desempeño económico de las tecnologías, evidenciando que las diferencias observadas no responden únicamente al diseño tecnológico, sino también a las capacidades locales y a los modelos de administración del servicio.

2.3 Entrevistas a Expertos y Operadores

De manera complementaria al levantamiento bibliográfico y al estudio de casos reales, se realizaron entrevistas semiestructuradas a actores clave vinculados a la operación, gestión, investigación y diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales, así como a instituciones relacionadas con la problemática regional de escasez hídrica. Este enfoque permitió incorporar una perspectiva cualitativa y contextual al análisis económico, enriqueciendo la interpretación de los resultados obtenidos a partir de fuentes documentales y datos cuantitativos.

El objetivo principal de las entrevistas fue:

- Comprender la magnitud y características de la problemática hídrica en la Región de Coquimbo desde la experiencia directa de actores locales.
- Identificar las principales soluciones y alternativas tecnológicas actualmente implementadas o evaluadas en la región frente a escenarios de escasez hídrica.

- Recoger información cualitativa y cuantitativa relevante para el análisis económico comparativo, particularmente en lo relativo a costos reales de inversión, costos de operación y mantención, requerimientos de personal, y costo de soluciones alternativas.

Las entrevistas se desarrollaron bajo una modalidad semiestructurada, combinando preguntas orientadas a levantar información técnica y económica con espacios abiertos para recoger percepciones, aprendizajes y recomendaciones basadas en la experiencia práctica de los entrevistados. Esta metodología permitió captar tanto antecedentes comparables entre casos como aspectos específicos de cada contexto institucional y territorial.

Las personas entrevistadas incluyeron representantes de servicios sanitarios rurales, municipalidad, centros de investigación, empresa de ingeniería y programas de fomento productivo, abarcando así una diversidad de miradas técnicas, operacionales y estratégicas. En conjunto, las entrevistas constituyeron un insumo clave para el análisis comparativo desarrollado en las secciones posteriores, permitiendo una lectura más integral de los resultados económicos y reforzando la pertinencia territorial de las conclusiones del estudio. Las fuentes consultadas, se detallan en la sección anexos.

2.4 Levantamiento de costos para humedal construido

Para el levantamiento de costos asociados a la tecnología de humedal construido, se utilizaron como base los costos reales incurridos en la implementación del humedal piloto desarrollado en el marco del proyecto de Bien Público, correspondiente al humedal construido en la Pisquera Fundo Los Nichos. Esta información considera antecedentes efectivos de diseño, construcción y puesta en marcha del sistema, lo que permitió contar con datos actualizados y ajustados a las condiciones territoriales de la Región de Coquimbo.

Con el objeto de asegurar la comparabilidad económica entre las distintas tecnologías evaluadas, los costos del humedal depurador fueron estructurados utilizando las mismas partidas de inversión y supuestos generales considerados en el Estudio “Soluciones Sanitarias para el Sector Rural” de SUBDERE (2018). En particular, se homologaron las categorías de costos asociadas a obras civiles, tratamiento primario y secundario, equipamiento, instalaciones eléctricas, materiales, gastos generales y utilidades, permitiendo así una comparación consistente metodológicamente entre humedales construidos, lombrifiltros y sistemas de lodos activados.

Los costos directos del humedal piloto del proyecto fueron ajustados a partir de su superficie efectiva y características técnicas, y posteriormente extrapolados a una escala estándar, incorporando los factores de gastos generales y utilidades definidos en el estudio de referencia. Este enfoque permitió reducir sesgos derivados de diferencias metodológicas entre fuentes de información, fortaleciendo la validez del análisis comparativo.

Cabe señalar que el estudio de SUBDERE considera sistemas de tratamiento diseñados para atender poblaciones entre 100 y 3.500 personas, incorporando economías de escala relevantes en los costos de inversión y operación. No obstante, para efectos de la presente evaluación económica comparativa, se definió como base de cálculo una población equivalente de 100 personas,

coherente con el objetivo de analizar tecnologías aplicables a contextos rurales, comunitarios y productivos de pequeña y mediana escala.

La elección de esta escala de referencia responde a la necesidad de evitar distorsiones significativas asociadas a economías de escala, que podrían generar desviaciones relevantes al extrapolar los costos reales del humedal del proyecto a sistemas de mayor tamaño. De esta forma, el análisis se focaliza en un rango de aplicación donde las diferencias de costos entre tecnologías responden principalmente a sus características intrínsecas, y no a efectos de escala que podrían enmascarar los resultados.

3. Análisis Comparativo de Tecnologías

3.1 Criterios de Comparación

- Costos de inversión (CAPEX)

Corresponde a los costos asociados al diseño, obras civiles, equipamiento, instalaciones eléctricas y puesta en marcha de cada sistema. Este criterio resulta especialmente relevante para servicios sanitarios rurales, municipios y empresas productivas de menor escala, donde las restricciones de acceso a financiamiento hacen que el monto de inversión inicial sea un factor determinante en la toma de decisiones. No se consideró los costos asociados al terreno para instalación del sistema, al ser este un factor variable según el contexto territorial.

Como se señaló precedentemente los valores para las tecnologías de Lodo Activado y Lombrifiltro corresponden a los señalados en el Estudio SUBDERE (2018), para 100 personas. En el caso del Humedales, corresponde a valores de base de Humedal Los Nichos, ajustado para 100 personas. En todos los casos se realiza análisis comparativo con otras fuentes consultadas a modo de comparar y contrastar información.

- Costos operacionales (OPEX)

Incluye los costos anuales de operación y mantención, tales como consumo energético, insumos químicos, mano de obra, mantenciones preventivas y correctivas, análisis de laboratorio y gestión de residuos asociados (por ejemplo, lodos). Este criterio es clave para evaluar la sostenibilidad de largo plazo de las tecnologías, considerando que múltiples diagnósticos nacionales han evidenciado que los principales problemas de funcionamiento de las plantas de tratamiento se asocian a altos costos operacionales y no a fallas de diseño.

- Requerimientos de espacio

Considera la superficie necesaria para la implementación de cada sistema de tratamiento. Este aspecto resulta particularmente relevante al comparar tecnologías intensivas en infraestructura compacta versus soluciones que requieren mayor disponibilidad de terreno, como los humedales construidos, y debe ser analizado en función del contexto de aplicación (rural, periurbano o productivo).

- Normativa sanitaria y ambiental aplicable

Analiza la compatibilidad de cada tecnología con el marco normativo vigente en materia de tratamiento y disposición de aguas residuales, así como su potencial adecuación a escenarios futuros de mayor exigencia regulatoria, particularmente en relación con el reúso de aguas tratadas y la gestión sostenible del recurso hídrico.

3.2 Resultados económicos y operacionales de las tecnologías

3.2.1. Sistema de Lodos Activados

a) CAPEX

El costo de inversión asociado a la tecnología de lodos activados se estimó a partir del análisis de los antecedentes contenidos en el Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural elaborado por SUBDERE (2018), considerando un sistema diseñado para una población equivalente de 100 personas, con el fin de asegurar comparabilidad con las demás tecnologías evaluadas y coherencia con contextos rurales y de pequeña escala.

De acuerdo con dicho estudio, el CAPEX total del sistema de lodos activados alcanza un valor de **$228.417.276** (pesos de 2018), el cual se compone de costos directos por un monto de **$151.497.125** y costos indirectos por **$76.920.151**. Los costos directos representan aproximadamente el **66% del costo total** y se concentran principalmente en obras civiles, que corresponden a la mayor partida individual, seguidas por equipos electromecánicos e instalaciones eléctricas e instrumentación (IIEE). Esta estructura de costos refleja la alta intensidad de infraestructura y equipamiento propia de los sistemas de lodos activados, incluso en escalas reducidas de población.

Los costos indirectos considerados en la estimación incluyen gastos generales y utilidades, ingeniería e inspección técnica de obras (ITO), aplicados como porcentajes sobre los costos directos **(47,57%)**, de acuerdo con los supuestos metodológicos definidos por SUBDERE.

Para efectos de la presente evaluación económica, los costos de inversión fueron actualizados a valores de 2025, obteniéndose un CAPEX equivalente de **$329.149.295** (valor corregido por IPC a Dic 2025). Esta actualización permite reflejar de manera más realista los niveles actuales de inversión requeridos para la implementación de un sistema de lodos activados de pequeña escala.

La magnitud y composición del CAPEX estimado resultan consistentes con las características observadas en casos reales de la región, como la PTAS del APR Gualliguaica. En particular, el sistema de lodos activados de Gualliguaica presenta una alta presencia de obras civiles de hormigón, sistemas de aireación mecánica, equipamiento electromecánico, tableros eléctricos y componentes de control, los cuales coinciden con las principales partidas de inversión consideradas en la estimación del CAPEX para un sistema de 100 personas. Asimismo, la necesidad de instalaciones eléctricas relevantes y de equipamiento especializado refuerza el carácter intensivo en infraestructura y tecnología de este tipo de soluciones, incluso en contextos rurales y de pequeña escala. No se dispone de información de costos de inversión de la planta de Gualliguaica.

b) OPEX

Los costos de operación y mantención (OPEX) asociados a la tecnología de lodos activados fueron estimados al igual que el CAPEX; en base al estudio SUBDERE (2018).

De acuerdo con dicho estudio, el costo operacional anual total del sistema de lodos activados asciende a **$15.537.159** (pesos de 2018), el cual, actualizado a valores de 2025, alcanza un monto equivalente de **$22.389.046** anuales. Este valor refleja la naturaleza intensiva en operación y control técnico de esta tecnología, incluso en escalas reducidas.

La estructura del OPEX (actualizado a 2025), se compone principalmente de los siguientes ítems:

Energía eléctrica, con un costo anual actualizado de **$3.266.927**, asociado al funcionamiento continuo de los sistemas de aireación, bombeo y control, los cuales constituyen un componente crítico del proceso de tratamiento en sistemas de lodos activados.

Productos químicos, con un costo relativamente menor de **$154.850** anuales, vinculados a labores específicas de operación y mantención.

Operación y mantención, que representa el componente más significativo del OPEX, con un valor actualizado de **$18.967.566 anual**. Dentro de este ítem se incluyen costos relevantes asociados a personal de operación, así como los servicios de análisis de laboratorio, necesarios para dar cumplimiento a la normativa ambiental vigente.

Al contrastar los costos de operación y mantención (OPEX) estimados a partir del estudio SUBDERE con la información levantada en terreno en el caso del APR Gualliguaica, se observan algunas diferencias relevantes que resulta pertinente explicitar para una adecuada interpretación del análisis económico.

En primer lugar, en la información reportada por el APR Gualliguaica no se identifican de manera explícita los costos asociados a análisis de laboratorio, a pesar de que este ítem representa un componente significativo dentro del OPEX modelado por SUBDERE. En el caso del sistema de lodos activados para 100 personas, los costos de laboratorio asociados al cumplimiento de la normativa ambiental vigente alcanzan entre un 20% y 30% del costo operacional total, lo que evidencia su relevancia dentro de la estructura de costos de este tipo de sistemas.

En segundo término, al descontar los costos de análisis de laboratorio del OPEX total estimado por SUBDERE y actualizar los valores a pesos de 2025, el costo operacional anual del sistema de lodos activados para 100 personas se sitúa en torno a los $18 millones. En contraste, los costos operacionales informados por el APR Gualliguaica ascienden aproximadamente a $24 millones anuales, considerando que dicho sistema abastece a una población cercana a 500 personas.

Si bien estas diferencias pueden explicarse parcialmente por economías de escala, así como por particularidades propias del diseño y operación del sistema, se asume que una parte de la brecha observada podría estar asociada a subregistros o a la no identificación explícita de ciertos costos reales, tales como monitoreo ambiental, mantenciones mayores u otros gastos indirectos asociados a la operación efectiva de la planta.

Este contraste refuerza la importancia de utilizar valores de referencia estandarizados, como los propuestos por SUBDERE, para efectos de comparación económica entre tecnologías, complementándolos con información levantada en terreno que permita contextualizar y matizar los resultados, especialmente en contextos rurales donde los registros de costos operacionales pueden presentar limitaciones.

c) Requerimientos de espacio

En relación con los requerimientos de espacio, la información levantada a partir de la planilla de diseño del sistema de lodos activados para una población equivalente de 100 personas, del estudio SUBDERE, indica que la planta requiere una superficie total aproximada de 2.596 m², con un emplazamiento de 59 metros de largo por 44 metros de ancho. Esta superficie incluye tanto las unidades de tratamiento propiamente tales como las áreas complementarias necesarias para la operación del sistema.

Dentro de la superficie total, se consideran aproximadamente 229 m² correspondientes a caminos interiores, necesarios para el acceso, operación, mantención y eventuales labores de reparación del equipamiento electromecánico. Asimismo, el diseño contempla un cerco perimetral de 206 metros lineales, lo que refleja la necesidad de resguardar la infraestructura, el equipamiento eléctrico y los procesos de tratamiento, especialmente en contextos rurales o periurbanos.

Si bien los sistemas de lodos activados se caracterizan por una mayor compactación del proceso de tratamiento en comparación con soluciones basadas en la naturaleza, el análisis evidencia que incluso en escalas reducidas de población los requerimientos de superficie no son menores, particularmente al considerar las áreas destinadas a circulación, seguridad y operación. En este sentido, el espacio requerido no se limita únicamente a los reactores y unidades de tratamiento, sino que incorpora una fracción relevante de superficie asociada a infraestructura auxiliar.

Otro análisis interesante de realizar, al observar los datos del estudio SUBDERE, se relaciona con cómo se incrementa el área requerida para una planta de Lodo Activado. Considerando que el estudio entrega información para plantas que sirven desde 100 a 3.500 personas, se observa que el aumento de la superficie requerida se incrementa en menos de un 100%, es decir a menos del doble, lo que indica que, en términos de área requerida, existe una importante economía de escala al aumentar la población atendida.

d) Normativa sanitaria y ambiental aplicable

De acuerdo con los supuestos establecidos en el Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural elaborado por SUBDERE (2018), los sistemas de lodos activados se diseñan para cumplir con los estándares de calidad del efluente establecidos en el DS N°90/2000, específicamente los límites definidos en la Tabla N°1, aplicable a la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua superficiales.

Adicionalmente, el estudio considera el cumplimiento del DS N°04/2009 en lo relativo al manejo y disposición de lodos generados por el proceso de tratamiento, clasificando los lodos producidos como lodos Clase B. Esta clasificación implica la necesidad de implementar prácticas específicas de manejo, almacenamiento y disposición final, así como la realización periódica de análisis de laboratorio para asegurar el cumplimiento de los parámetros sanitarios y ambientales exigidos por la normativa vigente.

El cumplimiento normativo asociado a los sistemas de lodos activados conlleva, por tanto, una alta carga de requerimientos operacionales y de monitoreo, tanto para el control de la calidad del efluente como para la adecuada gestión de los lodos generados. Estos requerimientos se traducen en mayores exigencias en términos de personal capacitado, frecuencia de muestreo, análisis de

laboratorio y trazabilidad de los residuos, aspectos que deben ser considerados, especialmente en contextos rurales y de pequeña escala.

Adicionalmente, la operación de plantas de tratamiento basadas en lodos activados puede encontrarse sujeta a otras disposiciones normativas, dependiendo del contexto de descarga y operación del sistema. Entre ellas, destaca el DS N°46/2002 en caso de descarga o infiltración a aguas subterráneas, así como el DS N°594/1999, que regula las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, particularmente relevante dada la generación y manejo de lodos biológicos y el uso intensivo de equipamiento electromecánico. Asimismo, la instalación y operación de los sistemas eléctricos debe cumplir con la normativa vigente de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC).

3.2.2. Sistema de Lombrifiltro

a) CAPEX

Al igual que el sistema anterior, el costo de inversión asociado a la tecnología de lombrifiltro corresponde a los indicados en el Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural elaborado por SUBDERE (2018), diseñado para una población equivalente de 100 personas.

De acuerdo con dicho estudio, el CAPEX total del sistema de lombrifiltro alcanza un monto de **$62.610.922** (pesos de 2018), el cual, actualizado a valores de 2025, equivale aproximadamente a **$90.222.337**. Este valor representa una inversión significativamente menor en comparación con los sistemas de lodos activados de igual escala, reflejando la menor complejidad tecnológica y menor intensidad de infraestructura electromecánica característica de esta alternativa.

La estructura del CAPEX del lombrifiltro se concentra principalmente en obras civiles (+70%), que constituyen la partida de mayor peso dentro del total de inversión, seguidas por el equipamiento específico del sistema. En contraste con los sistemas de lodos activados, las partidas asociadas a instalaciones eléctricas y equipos electromecánicos representan una fracción menor del costo total, lo que se traduce en menores requerimientos de infraestructura eléctrica y de control.

Las partidas correspondientes a tuberías y accesorios presentan un peso reducido dentro del CAPEX total, lo que refleja un diseño más simple del sistema de conducción y distribución del afluente. En conjunto, esta composición de costos evidencia que el lombrifiltro se configura como una alternativa de menor intensidad de capital, especialmente adecuada para contextos rurales y de pequeña escala, donde las restricciones presupuestarias y de acceso a financiamiento son relevantes.

De acuerdo con la información levantada en terreno, la planta de tratamiento mediante lombrifiltro de la localidad de Huatulame, en la comuna de Monte Patria, fue valorizada al año de su construcción (2001) en un monto aproximado de $52.000.000, correspondiente a un sistema diseñado para una población cercana a 2.826 personas. Al actualizar dicho valor a precios de 2025, el costo de inversión alcanza aproximadamente $128.000.000.

Al contrastar este antecedente con los valores de referencia entregados por el Estudio de Soluciones Sanitarias para el Sector Rural de SUBDERE para sistemas de mayor escala, se observa una diferencia significativa en términos de inversión. En particular, el estudio SUBDERE estima que el CAPEX actualizado a 2025 para una planta de lodos activados diseñada para 3.000 personas asciende a $686.904.526, lo que evidencia que el sistema de lombrifiltro constituye una alternativa considerablemente más económica en términos de costos de inversión, incluso considerando diferencias de escala y año de construcción.

b) OPEX

De acuerdo con los antecedentes analizados (SUBDERE, 2018), el costo operacional anual total del sistema de lombrifiltro asciende a $9.682.000 anuales (pesos de 2018), que actualizados a 2025, alcanzan a $13.951.762. Este valor refleja una estructura de costos significativamente menor en comparación con los sistemas de lodos activados, lo que se asocia a la menor complejidad operativa y menor dependencia energética de esta tecnología.

La composición del OPEX muestra que el ítem de servicios de laboratorio representa el componente más relevante, con un monto, equivalente al 62% del costo operacional total. Este gasto se asocia principalmente al cumplimiento de los requerimientos de monitoreo exigidos por la normativa ambiental vigente, evidenciando que, aun tratándose de una tecnología de menor complejidad, los costos de control y cumplimiento normativo continúan siendo un factor determinante en la operación del sistema.

Los servicios de operación y mantención constituyen el segundo componente más significativo del OPEX, con un costo anual, equivalente al 26% del total, e incluyen labores básicas de operación, mantención del sistema biológico y gestión general de la planta. En contraste, los costos asociados a energía eléctrica (4%) y productos químicos (3%) presentan una incidencia marginal, lo que refleja la baja intensidad energética y química del proceso de tratamiento mediante lombrifiltro.

c) Requerimientos de espacio

En relación con los requerimientos de espacio, el sistema de lombrifiltro diseñado para una población equivalente de 100 personas presenta una superficie total aproximada de 840 m², correspondiente a un emplazamiento de 28 metros por 30 metros. De esta superficie, el área estrictamente destinada a la planta de tratamiento alcanza aproximadamente 45 m², concentrándose el resto en espacios auxiliares necesarios para la operación y gestión del sistema.

Los espacios complementarios considerados incluyen caminos interiores, franjas arbóreas, áreas de circulación y seguridad, así como espacios destinados a estacionamiento y acceso, los cuales cumplen funciones operativas y de resguardo, pero no corresponden directamente a unidades de tratamiento.

Un aspecto relevante del análisis es que, a diferencia de los sistemas de lodos activados, el lombrifiltro presenta economías de escala más acotadas en términos de superficie requerida. De acuerdo con los antecedentes presentados el estudio SUBDERE, mientras un sistema de lombrifiltro para 100 personas requiere aproximadamente 840 m², un sistema diseñado para 3.500 personas

requiere del orden de 3.315 m², lo que implica que el aumento de capacidad no se traduce en una reducción proporcional del área requerida por habitante equivalente.

No obstante, lo anterior, incluso considerando esta menor eficiencia de escala, los requerimientos de espacio del lombrifiltro siguen siendo inferiores, específicamente en sistemas pequeños. A modo de ejemplo el estudio indica que para un sistema de lodo activado para 1000 personas se requieren 3.350mts2, que prácticamente es el mismo requerimiento de espacio que para una planta de lombrifiltro para 3.500 personas (3.315 mts2).

d) Normativa sanitaria y ambiental aplicable

Al igual que las plantas de Lodo Activado, bajo lo indicado en el estudio SUBDERE, los sistemas de lombrifiltro se evalúan considerando el cumplimiento de los estándares de calidad del efluente establecidos en el DS N°90/2000, específicamente los límites definidos en la Tabla N°1, aplicables a la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua superficiales.

A diferencia de los sistemas de lodos activados, el lombrifiltro se caracteriza por una menor generación de lodos residuales, lo que reduce la complejidad asociada a su manejo y disposición final. No obstante, los lodos generados deben igualmente cumplir con las disposiciones establecidas en el DS N°04/2009, relativas a la clasificación, almacenamiento y disposición sanitaria de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas. En este sentido, el menor volumen de lodo generado constituye una ventaja operacional, aunque no exime del cumplimiento normativo correspondiente.

Desde el punto de vista del control ambiental, el estudio SUBDERE y la experiencia nacional indican que los sistemas de lombrifiltro presentan una mayor sensibilidad a variaciones de carga y a la presencia de compuestos tóxicos, lo que hace especialmente relevante el cumplimiento de las exigencias de monitoreo establecidas por la autoridad ambiental.

En términos operacionales, el lombrifiltro presenta menor complejidad asociadas a seguridad laboral y riesgos eléctricos, en comparación con tecnologías intensivas en equipamiento electromecánico. No obstante, siguen siendo aplicables las disposiciones generales del DS N°594/1999, relativas a las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, especialmente en lo referido al manejo de residuos, control de vectores y condiciones de operación.

En conjunto, el marco normativo aplicable al lombrifiltro es similar al de otras tecnologías de tratamiento en cuanto a estándares de emisión, pero presenta menores exigencias asociadas a la gestión de lodos y a la complejidad operacional, lo que lo posiciona como una alternativa normativamente viable y operativamente más simple para contextos rurales y de pequeña escala.

3.2.3. Sistema Humedal Construido

Respecto al sistema de Humedal para el tratamiento de aguas residuales, la información proviene de los costos reales incurridos en la construcción del humedal en Pisco Los Nichos a través del proyecto CORFO 24BP 273014. Este humedal fue construido para el tratamiento entre 1 a 3 m3/día con un tamaño de 20 mts2 y diseñado para tratar riles provenientes de los procesos de lavado de

equipos de la industria del Pisco, lo que sin duda considera una carga contaminante más compleja que aguas residuales domésticas. Los datos fueron extrapolados para evaluar una unidad para 100 personas, para tener una base comparable con las otras tecnologías. Para ello se dimensionó una unidad de 50 mts2, dado que para aguas residuales y un humedal intensificado, es decir con aireación mecánica, la literatura indica que se requieren 0,5mts2/por persona.

A continuación, se presentarán los resultados para cada uno de los puntos en análisis:

a) CAPEX

El CAPEX del Humedal se construyó en base a los costos directos reales de construcción del humedal Pisco Los Nichos, el cual se estableció de acuerdo a las mismas partidas indicadas en el estudio Subdere (obras civiles, obras eléctricas, equipos y tuberías/accesorios),. Los valores obtenidos para 20 mts2 fueron extrapolados para llevarlos a una unidad para 100 personas de 50 mts2, alcanzando un costo directo de $83.750.000 para el HC.

Manteniendo los mismos supuestos metodológicos del estudio SUBDERE en cuantos a costos indirectos, el CAPEX final del HC alcanzaría a **$126.273.000.** Este valor ubicaría al HC en una posición intermedia entre una solución como el Lodo Activado y Lombrifiltro, Sin embargo es preciso hacer el alcance que en este caso se está considerando un humedal con aireación mecánica, que su gran ventaja, de acuerdo lo indica la literatura es disminuir aprox. a 1/5 la cantidad de espacio requerido para la instalación de la unidad, en contraste con uno que no considere aireación. Sobre este punto se profundizará en el apartado relacionado con el espacio requerido.

Para tener otras referencias, se buscaron otras fuentes que reportarán los costos de inversión del sistema de Humedales Construidos.

A nivel nacional, la Comisión Nacional de Riego (CNR) en 2024, realizó un estudio denominado “Diagnóstico para el reúso de aguas servidas tratadas en el riego rural”. Este estudio buscaba diagnosticar la situación actual de los sistemas de saneamiento de aguas servidas rurales y evaluar propuestas para su posible reúso para riego agrícola. El estudio contemplo incluir humedales artificiales como tratamiento terciario, para mejorar la calidad de las aguas. De 19 perfiles estudiados a nivel nacional 2 corresponde a la Región de Coquimbo, puntualmente para plantas de tratamientos de aguas servidas (PTAS) en las localidades de Lambert, comuna de La Serena y otro en la Comuna de Ovalle. De acuerdo a la información presentada, los costos de estas soluciones alcanzarían $67.777.738 en Lambert, para perfil con un caudal de diseño de 96m3/día, mientras que la solución considerada en la comuna de Ovalle, tiene un costo de $63.956.721, con un caudal de diseño de 117,6 m3/día. Estos valores reflejan diferencias importantes respecto a lo proyectado en base a costos reales (Proyecto Los Nichos), no obstante, no se tiene mayor información de las características del humedal considerado, se asume que debe corresponder a un humedal sin aireación mecánica, y según se indica se desarrolló en base a cotizaciones referenciales a una empresa privada.

Otra referencia a nivel internacional corresponde a la publicación “Construction and operations costs of constructed wetlands treating wastewater”(2014). En el se estudian 9 casos de sistemas de tratamiento en el norte de Grecia, y mediante análisis de regresión se deriva una ecuación para estimar costos de inversión y área requerida para humedales construidos sin aireación, considerando el costo del terreno. Los resultados indican que un humedal construido para 100

personas alcanzaría un costo total de $90.593.000 (actualizado a la fecha), valores que se son consistentes con los estimados con información real de costos del Proyecto Los Nichos.

En síntesis, las estimaciones de CAPEX del humedal construido desarrolladas en el proyecto se sitúan dentro de rangos coherentes y comparables con antecedentes nacionales e internacionales. Las diferencias observadas se explican principalmente por las características de diseño consideradas, en particular la incorporación de aireación mecánica y los requerimientos de superficie asociados. La cercanía de los valores estimados con los reportados en la literatura internacional, aun cuando estos incluyen el costo del terreno, respalda la consistencia del enfoque metodológico basado en costos reales de construcción utilizado en el proyecto.

b) OPEX

De acuerdo a los datos estimados en base a implementación de humedal desarrollado en el marco del proyecto CORFO24BP 273014, un humedal construido para una población de 100 personas, tendría un costo operacional anual estimado de $14.530.075. Para la estimación se mantienen algunos supuestos metodológicos del estudio SUBDERE, como los costos relacionados a servicios de laboratorios, los cuales, al igual que en los análisis anteriores, representan uno de los costos más representativos alcanzando un 35% de total anual. A su vez, el costo energético, al ser un humedal con aireación mecánica, representa un 17% de los costos totales. El costo más relevante estaría dado por los servicios de operación y mantención que alcanzan aprox. $5.500.000, un 38% del total anual. Los costos asociados a producto químicos y transporte de lodos son marginales.

Relevante señalar, respecto del consumo energético, que los requerimientos de un humedal de estas características se sitúan en una posición intermedia en relación a sistemas de lodo activado y lombrifiltro. De acuerdo al estudio SUBDERE el consumo energético de una planta de Lodos Activados para 100 personas alcanza a 6,68 Kwh/m3, mientras que el humedal en aprox 3,6 Kwh/m3 (información proyecto 24BP 273014) y por último el sistema de lombrifiltro con un consumo de 1,06 Kwh/m3 (SUBDERE, 2018).

Este punto es además relevante, porque junto con ser uno de los costos más significativos dentro del OPEX de las tecnologías, en estudio SUBDERE fue valorizado a un costo aprox $80/Kwh. (valor año 2018), sin embargo, el costo de la energía ha tenido un incremento superior al IPC, por tanto el OPEX de las tecnologías estaría subestimado, considerando que algunos precios se incrementan por sobre el IPC. Si es relevante apuntar que el consumo de los humedales con aireación se encuentra en un rango medio entre ambas tecnologías.

Adicionalmente se consideró un escenario para un humedal sin aireación mecánica. En este caso, el OPEX se estima en $12.174.588, que se obtiene de disminuir de manera importante el costo energético versus un humedal con aireación. En cuanto al consumo energético, el sistema de humedal sin aireación, sería muy similar a un sistema lombrifiltro, con un consumo de 1,164 Kwh/m3 el humedal y 1,06 kwh/m3 el sistema lombrifiltro.

En síntesis, el análisis de costos operacionales evidencia que el humedal construido con aireación mecánica, presenta un OPEX competitivo y fuertemente influenciado por los componentes de operación y mantenimiento y monitoreo ambiental, los cuales concentran una parte significativa del costo total anual. Al considerar precios actualizados de energía, cuyo incremento ha sido superior al IPC, se refuerza la necesidad de revisar críticamente las estimaciones históricas y de

comparar las tecnologías no solo en términos de consumo específico, sino también de su sensibilidad a variaciones de precios. En este contexto, los humedales con aireación mecánica se posicionan en un rango intermedio de consumo energético entre lodos activados y lombrifiltro, mientras que los humedales sin aireación mecánica muestran una reducción relevante del OPEX, alcanzando niveles de consumo similares a tecnologías de bajo requerimiento energético. Estos resultados destacan el potencial de los humedales, especialmente en configuraciones pasivas, como una alternativa eficiente y resiliente desde el punto de vista operacional.

c) Requerimientos de espacio

En cuanto a los requerimientos de espacio en base a literatura internacional[1] se establece que el requerimiento de área para un humedal con aireación mecánica estaría cercano a 0,5mts2/habitante. De esta manera para una población 100 personas se estima en 50 mts2. En función de esta superficie se realizaron los cálculos de costo de inversión, Es importante considerar que esto aplica a solo la superficie destinada a la unidad de tratamiento y no considera área requerida para el establecimiento de obras anexas.

Al comparar con el área requerida para lombrifiltro para 100 personas, según estudio SUBDERE, se obtiene una superficie similar (45 mts2) para la unidad de tratamiento, y un total de 840 mts2, considerando las obras anexas. Sería razonable considerar un área similar en el caso del humedal considerando obras como caminos interiores, estacionamientos, bodegas, etc.

Como se mencionó en secciones anteriores, el área requerida para un humedal sin aireación mecánica aumenta considerablemente, según indica literatura especializada podría estar un rango de 1,2 a 5,0 m2/ habitante.

La figura a continuación presenta áreas requeridas según tecnología de tratamiento. En el caso de los humedales considerados en esta evaluación correspondería al Humedal de FV (flujo vertical):

Figura 1: Requerimientos de terreno para algunas tecnologías de tratamiento de aguas residuales como tratamiento secundario en climas cálidos a templados.

Tecnología de tratamiento	**Requerimiento de área (m^2/ hab-eq)**
Laguna facultativa [a]	2,0 – 6,0
Laguna Anaerobia + facultativa [a]	1,2 – 3,0
Reactor UASB [a]	0,03 – 0,10
Lodos activados, SBR [a]	0,12 – 0,30
Filtros percoladores	0,15 – 0,40
Humedales de FH [b]	3,0 – 10,0
Humedales de FV [b]	1,2 – 5,0
Humedales verticales tipo francés [c]	2,0 – 2,5

[a] (von Sperling, 2007a)
[b] Para climas cálidos (Hoffmann *et al.*, 2011) y templados (Kadlec y Wallace, 2009)
[c] Para climas templados (Molle *et al.*, 2005)

[1] Nivala, J., Murphy, C., Freeman, A., 2020. Recent Advances in the Application, Design, and Operations & Maintenance of Aerated Treatment Wetlands. Water (Basel) 12, 1188. https://doi.org/10.3390/w12041188

Otra referencia internacional se obtiene de la publicación “Construction and operations costs of constructed wetlands trateing wastewater” (2014), donde de acuerdo a la ecuación señalada, el área total requerida para un humedal sin aireación mecánica alcanza a 650mts2. Como se señalaba precedentemente en una magnitud coherente con la indicada para una planta de lombrifiltro.

En síntesis, el análisis de requerimientos de espacio evidencia que los humedales construidos con aireación mecánica presentan una ventaja significativa en términos de superficie requerida para la unidad de tratamiento, no obstante, se incrementan sus costos de inversión asociados a equipamiento. En el caso de humedales sin aireación mecánica, la mayor demanda de superficie constituye una limitante relevante, especialmente en contextos con restricciones de terreno, aunque se mantiene dentro de rangos coherentes con soluciones de tratamiento de baja intensidad energética, como son los sistemas de lombrifiltro. Estos resultados refuerzan la importancia de evaluar los requerimientos de espacio de manera integral, considerando no solo la tecnología de tratamiento, sino también el contexto territorial y las condiciones de implementación de cada alternativa.

d) Normativa sanitaria y ambiental aplicable

Los humedales construidos destinados al tratamiento de aguas residuales se enmarcan dentro de la normativa sanitaria y ambiental vigente en Chile, la cual no regula la tecnología en sí misma, sino el destino final del efluente tratado, las condiciones de descarga y los eventuales riesgos ambientales asociados.

En términos de normativa ambiental, la principal referencia corresponde al DS N°90/2000 del Ministerio del Medio Ambiente, que establece la norma de emisión para la descarga de residuos líquidos a aguas superficiales.

En el caso de proyectos que contemplen el reúso del agua tratada, particularmente para fines de riego, la normativa aplicable se vincula a los criterios sanitarios definidos por la autoridad de salud, considerando parámetros microbiológicos y de calidad del agua compatibles con el uso previsto. En este contexto, la desinfección del efluente constituye una medida clave para asegurar condiciones sanitarias adecuadas, aun cuando el reúso no se encuentre regulado por una norma específica de alcance general.

Desde el punto de vista sanitario, los humedales construidos no generan lodos secundarios de manera continua, a diferencia de las plantas de tratamiento convencionales, por lo que no quedan sujetos de forma automática a la normativa de manejo de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas (DS N°4/2009). No obstante, en caso de retiro periódico de material acumulado en el sistema, este debe ser gestionado conforme a la normativa general de residuos, previa caracterización.

4. Sistematización de resultados económicos

Con el objetivo de facilitar la comparación entre las distintas alternativas tecnológicas evaluadas, se presentan a continuación tablas comparativas construidas bajo un marco metodológico común y

condiciones de borde homogéneas para todas las tecnologías analizadas. Dichas condiciones de borde consideran una misma escala de aplicación, caudal de diseño, exigencias normativas y horizonte de evaluación, tomando como referencia los supuestos definidos en el estudio SUBDERE. En el caso de los humedales construidos, los costos de inversión y operación se estiman a partir de información real levantada en el marco del proyecto CORFO Bien Público 24BP273014, manteniendo no obstante las mismas condiciones de borde aplicadas al resto de las alternativas, con el fin de asegurar la comparabilidad de los resultados y una evaluación consistente entre tecnologías.

Tabla 1: Condiciones de borde utilizadas para evaluación de tecnologías

Condiciones de borde	**Unidad**	**Valor**
Población de diseño	(habitantes)	100
Caudal de diseño m3/día	m3/día	12
Volumen tratado anual	M3/ año	4380
Gastos generales y utilidades (GGU)	% del Costo total directo	39,45%
Ingeniería	% Costo directo + GGU	3,43%
Inspección técnica de obra	% Costo directo + GGU	4,69%

4.1 Análisis comparativo costo de Inversión (CAPEX)

La tabla a continuación presenta una comparación de los costos de inversión (CAPEX) asociados a las tecnologías evaluadas. Los resultados muestran que el humedal construido, basado en costos reales del proyecto Bien Público, presenta un nivel de inversión intermedio respecto de las alternativas analizadas, con valores inferiores a los observados para lodos activados, pero superiores al lombrifiltro, cuya estimación se basa en antecedentes del estudio SUBDERE (2018).

Es importante considerar que los costos asociados al humedal construido se estiman a partir de información real levantada en el marco del proyecto Bien Público, correspondiente a una tecnología que se encuentra en una etapa de desarrollo y validación. En este contexto, es esperable que algunos costos de inversión y operación sean relativamente más altos que aquellos observados en tecnologías más maduras, debido a procesos de ajuste, aprendizaje y adaptación propios de las etapas iniciales de implementación. En la medida que esta solución avance hacia niveles mayores de estandarización y replicabilidad, es razonable anticipar una reducción de los costos reales, asociada a economías de aprendizaje y optimización de diseño. Aún con los resultados obtenidos. el humedal construido se posiciona como una alternativa competitiva, especialmente considerando que sus costos se sustentan en información actualizada y de implementación real, lo que refuerza la validez de la comparación.

Por otra parte, resulta pertinente realizar el alcance, que el análisis de costos de inversión se realizó para una escala de referencia de 100 personas, en función de la información disponible y con el objetivo de asegurar condiciones de borde homogéneas entre las tecnologías evaluadas. En este sentido, los costos unitarios presentados pueden variar al aumentar la escala de aplicación, particularmente en aquellas tecnologías que presentan economías de escala más marcadas. Bajo

este enfoque, es razonable asumir que soluciones como lombrifiltros y humedales construidos resultan especialmente pertinentes para proyectos de pequeña escala, donde no existen proyecciones significativas de crecimiento poblacional, mientras que tecnologías más complejas podrían mejorar su desempeño relativo en escenarios de mayor escala.

Tabla 2: Análisis Costo de Inversión por Tecnología (CAPEX)

Fuente de información	Tecnología	CAPEX M$	CAPEX M$/m3	CAPEX M$/por persona
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido	$126.273	$29	$1.263
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	$90.222	$21	$902
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lodos Activados	$329.149	$75	$3.291

A partir de los resultados reportados por SUBDERE y de la información levantada en el marco del proyecto Bien Público, se estimó el porcentaje de participación de las distintas partidas en el costo de inversión (CAPEX) para cada tecnología. El análisis muestra que, en lo relativo a equipos, los rangos de participación no presentan variaciones significativas entre las alternativas evaluadas. En contraste, se observan diferencias relevantes en la partida de obras civiles, la cual en el caso del lombrifiltro alcanza aproximadamente un 70% del CAPEX total, reflejando el mayor peso de la infraestructura asociada a esta tecnología.

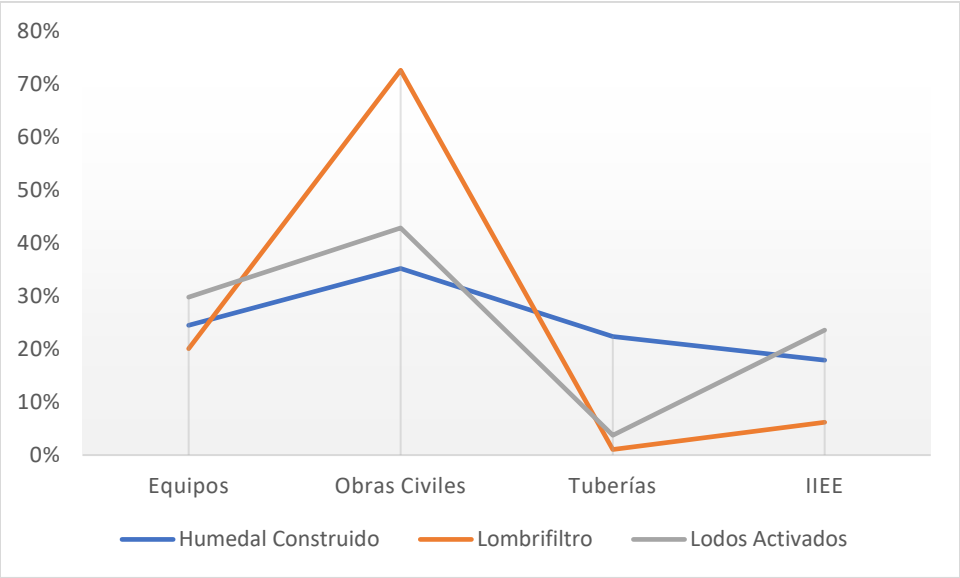
En el caso de los humedales construidos, una de las partidas más relevantes corresponde a tuberías y accesorios, lo que se explica por la naturaleza del sistema, que requiere una distribución hidráulica extensa y elementos asociados, tales como estanques, fosas y otras obras complementarias incluidas dentro de esta categoría. Finalmente, al analizar la partida de instalaciones eléctricas, se observa que los humedales con aireación mecánica y los sistemas de lodos activados presentan rangos de participación similares, lo cual es coherente con la incorporación de equipamiento electromecánico en ambos casos.

Tabla 3: Participación partidas de Costo de Inversión por tecnologías

Fuente de información	Tecnología	Equipos	Obras Civiles	Tuberías	IIEE
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido	24%	35%	22%	18%
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	20%	73%	1%	6%
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lodos Activados	30%	43%	4%	24%

A continuación, se presentan los resultados gráficamente para un mejor análisis:

Figura 2: Participación partidas de Costo de Inversión por tecnologías



4.2. Análisis comparativo costo de operación (OPEX)

En relación con los costos de operación (OPEX), los resultados muestran que el humedal construido con aireación mecánica se sitúa como una alternativa intermedia respecto de las tecnologías comparadas. No obstante, al incorporar el escenario de humedal sin aireación mecánica, se observa que, para una escala de referencia de 100 personas, esta alternativa presenta un costo operacional inferior al del lombrifiltro, posicionándose como la opción más económica en términos de OPEX.

Asimismo, es relevante destacar que los valores reportados en el estudio SUBDERE fueron actualizados a valores actuales mediante el Índice de Precios al Consumidor (IPC). Sin embargo, el análisis detallado de las partidas permite observar que algunos insumos clave, en particular el costo de la energía eléctrica, han experimentado incrementos superiores al IPC en el período analizado. En este contexto, es razonable suponer que los costos operacionales reales de tecnologías con mayor dependencia energética, especialmente los lodos activados, podrían ser superiores a los estimados, lo que reforzaría la ventaja relativa de los humedales construidos, en particular aquellos sin aireación mecánica.

Tabla 4: Análisis Costo de Operación anual por Tecnología (OPEX)

Fuente de información	Tecnología	OPEX M$	OPEX M$/m3	OPEX M$/por persona
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido (con aireación mecánica)	$14.530,07	$3,32	$145,30
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido (sin aireación mecánica)	$12.174,59	$2,78	$121,75
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	$13.951,76	$3,19	$139,52
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lodos Activados	$22.389,05	$5,11	$223,89

Con el objetivo de reflejar de mejor manera los antecedentes expuestos anteriormente, se realizó un análisis comparativo del consumo energético para cada una de las tecnologías evaluadas, considerando valores actualizados y utilizando un precio de referencia de $160 por kWh (Tarifas CGE a partir de 1 de enero 2026, BT1-BT2-BT3-BT4). Este ejercicio permite dimensionar la relevancia que tienen los costos energéticos dentro del costo operacional total y su incidencia en la comparación entre alternativas.

La tabla evidencia las diferencias en consumo energético específico (kWh/m³) y en el costo anual de energía entre las tecnologías evaluadas, considerando un valor actualizado de la energía eléctrica. Se observa que la planta de lodos activados presenta el mayor consumo energético, alcanzando 6,68 kWh/m³, lo que se traduce en el costo anual más elevado, cercano a $4.698.000, reflejando su alta dependencia energética. En contraste, tecnologías de menor intensidad energética, como el lombrifiltro y el humedal construido sin aireación mecánica, presentan consumos cercanos a 1,06–1,16 kWh/m³, con costos anuales significativamente menores. El humedal construido con aireación mecánica se posiciona en un rango intermedio, con un consumo de 3,6 kWh/m³, lo que confirma su carácter híbrido entre soluciones pasivas y sistemas convencionales, manteniendo una ventaja relativa frente a lodos activados en escenarios de alza de precios de la energía.

Tabla 5: Consumo energético por Tecnología

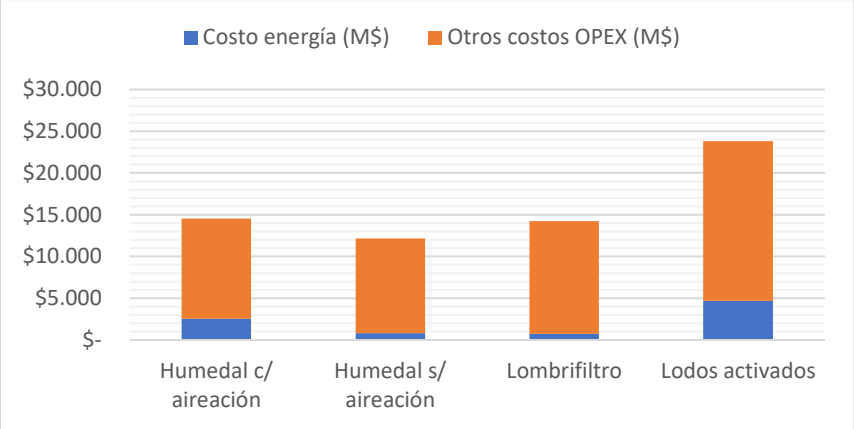
Fuente de información	**Tecnología**	**Consumo Kwh/ m3**	**Costo anual energía M$**
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido (con aireación mecánica)	3,595	$ 2.528
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido (sin aireación mecánica)	1,164	$ 819
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	1,060	$ 745
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lodos Activados	6,680	$ 4.698

Complementando lo anterior, resulta relevante analizar la participación del costo energético dentro de los costos totales de operación de cada tecnología. El gráfico a continuación, evidencia que, en el caso de la planta de lodos activados, el costo de la energía representa una fracción significativamente mayor del OPEX total en comparación con las demás alternativas, confirmando la alta dependencia energética de este sistema. Este resultado es coherente con los antecedentes levantados en terreno, donde el consumo eléctrico es identificado como uno de los costos críticos de la operación, lo que reduce la resiliencia de la tecnología frente a escenarios de alza en los precios de la energía.

Si bien este impacto podría mitigarse parcialmente mediante la incorporación de soluciones de energía solar u otras fuentes renovables, en la práctica las unidades de pequeña escala enfrentan restricciones de financiamiento que dificultan la materialización de este tipo de inversiones. En este

contexto, tecnologías de menor intensidad energética, como los humedales construidos y el lombrifiltro, presentan una mayor ventaja operativa y económica, al reducir su exposición a uno de los principales factores de incertidumbre en los costos de operación.

Figura 3: Consumo energético por Tecnología/ sobre costos operacionales totales



4.3. Área requerida por Tecnología

Este aspecto constituye un factor crítico de análisis, el cual, de acuerdo con el estudio SUBDERE, no es incorporado directamente dentro de los costos de inversión, debido a la alta variabilidad que puede presentar según el contexto territorial, la disponibilidad y el valor del suelo. No obstante, su consideración resulta clave para evaluar la factibilidad de implementación de las distintas tecnologías.

Para una escala de referencia de 100 personas, se observa que las plantas de lodos activados requieren al menos un 200% más de superficie que una planta de lombrifiltro, lo que constituye una limitante relevante en contextos con restricciones de terreno. En el caso de los humedales construidos, se consideraron dos referencias complementarias. La primera corresponde a la superficie requerida por la unidad de tratamiento con aireación mecánica, la cual es similar a la del lombrifiltro para la misma escala, por lo que resulta razonable asumir que ambas tecnologías podrían requerir una superficie total comparable, considerando obras anexas. La segunda referencia corresponde a la literatura internacional, donde se estima una superficie total del orden de 650 m² para un humedal construido sin aireación mecánica.

En términos generales, la superficie requerida por los humedales puede variar significativamente según su configuración, desde valores cercanos a 0,5 m² por persona en sistemas con aireación mecánica, hasta rangos del orden de 5 m² por persona en humedales sin aireación, según lo reportado en la literatura especializada. En este contexto, es posible afirmar que, para proyectos de pequeña escala, como el analizado para 100 personas, las alternativas de humedales construidos (con o sin aireación) y el lombrifiltro resultan más adecuadas en escenarios donde existen

restricciones de terreno y no se proyecta un aumento significativo de la población o del volumen de aguas residuales a tratar.

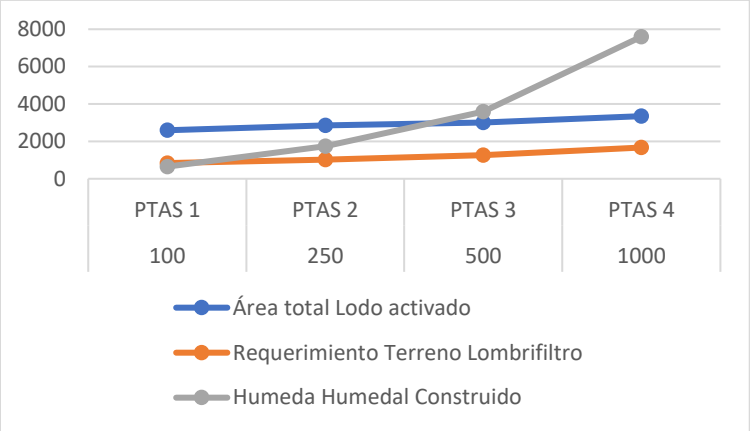
Tabla 6: Requerimientos de espacio 100 personas

Fuente de información	Tecnología	Área M2/100 habitantes	Observación
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido (con aireación mecánica)	50,0	Corresponde sólo a la unidad de tratamiento, sin considerar obras anexas
"Construction and operations costs of constructed wetlands trateing wastewater" (2014)	Humedal Construido (sin aireación mecánica)	650,0	Área total, considerando obras anexas
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	45,6	Corresponde sólo a la unidad de tratamiento, sin considerar obras anexas
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	840,0	Área total, considerando obras anexas
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lodos Activados	2596,0	Área total, considerando obras anexas

Para complementar el análisis anterior, y considerando los antecedentes del estudio SUBDERE para lombrifiltros y plantas de lodos activados, junto con información proveniente de literatura especializada para humedales construidos sin aireación mecánica, se realizó una simulación del área requerida para abastecer poblaciones de 100, 250, 500 y 1.000 personas. Este ejercicio permite aproximar el comportamiento de cada tecnología frente a cambios de escala y evaluar las economías de escala asociadas, así como identificar rangos de población en los cuales resulta más conveniente optar por una u otra alternativa.

La gráfica evidencia que, desde el punto de vista del requerimiento de superficie, los humedales construidos sin aireación, presentan un crecimiento más acelerado del área total a medida que aumenta la población atendida, especialmente a partir de las 500 personas, lo que puede constituir una limitante en contextos con restricción de terreno. En contraste, para escalas pequeñas y medianas, particularmente hasta 500 personas, la solución de humedales construidos se muestra competitiva y adecuada en escenarios donde la disponibilidad de suelo es limitada, manteniendo una relación favorable entre superficie requerida y capacidad de tratamiento. A partir de escalas mayores, tecnologías más compactas podrían presentar ventajas relativas en términos de uso del suelo.

Figura 4: Requerimientos de espacio M2 hasta 1000 personas



4.3. Análisis comparativo Valor Actual de Costos (VAC) Tecnologías

En el presente estudio no se utilizaron los indicadores financieros tradicionales de rentabilidad, como el Valor Actual Neto (VAN) ni la Tasa Interna de Retorno (TIR), debido a que las alternativas evaluadas corresponden a tecnologías de tratamiento de aguas residuales orientadas al cumplimiento normativo y a la provisión de un servicio público, sin generación de ingresos directos asociados. En este contexto, la evaluación se realizó bajo un enfoque de costo-eficiencia, utilizando el Valor Actual de Costos (VAC) como principal indicador económico, el cual permite comparar alternativas que entregan un nivel de servicio equivalente, identificando aquella que presenta el menor costo total actualizado durante su vida útil[2]. El análisis se desarrolló para una escala de referencia de 100 personas, y para un periodo de 10 años, en función de la información disponible y con el objetivo de asegurar condiciones de borde homogéneas entre tecnologías; no obstante, resulta recomendable extender este análisis a mayores escalas de población, con el fin de evaluar posibles economías de escala y eventuales cambios en el desempeño relativo de las alternativas.

Tabla 7: VAC comparativo entre tecnologías evaluadas

Fuente de información	Tecnología	CAPEX	OPEX (VA)	Valor Actual Costos (VAC)	% Variacion respecto HC
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido	$126.273	$89.281	$215.554	-
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	$90.222	$85.728	$175.950	-23,81%
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lodos Activados	$329.149	$137.571	$466.720	102,10%

[2] Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2025). Metodología general para la formulación y evaluación de proyectos de inversión pública.

Los resultados del Valor Actual de Costos (VAC) muestran diferencias relevantes entre las tecnologías evaluadas bajo una escala de referencia de 100 personas. El lombrifiltro presenta el menor VAC, con un valor aproximado de $176 millones, lo que representa una reducción cercana al 24% respecto del humedal construido, posicionándose como la alternativa de menor costo total actualizado en el horizonte analizado. Por su parte, el humedal construido alcanza un VAC de aproximadamente $215 millones, ubicándose en una posición intermedia y consolidándose como una alternativa competitiva desde el punto de vista económico, especialmente considerando que sus costos se basan en información real de implementación y corresponden a una tecnología en etapa de desarrollo. En contraste, la planta de lodos activados presenta el mayor VAC, con un valor cercano a $467 millones, más del 100% superior al del humedal construido, lo que refleja el efecto combinado de una alta inversión inicial y mayores costos operacionales. En este contexto, el análisis de VAC refuerza la conveniencia relativa de tecnologías de menor complejidad y menor dependencia energética para proyectos de pequeña escala, como el evaluado en el presente estudio.

4.4. Análisis sensibilidad Tecnologías

Con el fin de evaluar y comparar los resultados obtenidos bajo distintos escenarios, se desarrolló un análisis de sensibilidad orientado a identificar cómo se comportan las distintas alternativas frente a cambios en variables clave y contextos de implementación. A diferencia de un análisis de sensibilidad puramente cuantitativo, este ejercicio combina variables económicas con criterios de carácter operativo y/o territorial, reconociendo que la selección de una tecnología de tratamiento de aguas residuales no depende únicamente de costos, sino también de condiciones de borde que pueden afectar de manera diferenciada a cada alternativa.

En particular, el análisis considera escenarios de aumento en el costo de la energía eléctrica, incrementos en los costos de operación y mantenimiento, así como situaciones no cuantitativas asociadas a restricciones de superficie disponible, cambios de escala poblacional y variabilidad en las características del efluente en contextos productivos. Este enfoque permite complementar la evaluación económica con una mirada más integral, incorporando factores de riesgo y adaptabilidad que resultan especialmente relevantes en proyectos de pequeña y mediana escala, y contribuye a una mejor comprensión de la pertinencia de cada tecnología en distintos contextos de aplicación.

4.4.1. Variaciones en costo de la energía eléctrica

Como ya fue mencionado, al analizar los datos del estudio SUBDERE, se pudo pesquisar que el costo de la energía calculado ha tenido un aumento mayor al IPC entre 2018 y 2025. Por ello resulta conveniente evaluar las variaciones en el OPEX para las tecnologías consideradas, bajo un supuesto de incremento de los costos energéticos. En este caso se consideró un aumento del 30% del costo energético. Los resultados a continuación:

Tabla 8: Sensibilidad OPEX ante alzas costos energía

Fuente de información	Tecnología	OPEX M$	OPEX M$ (con incremento de 30% energía)	Variacion OPEX%
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido (con aireación mecánica)	$14.530	$15.286	5,20%
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido (sin aireación mecánica)	$12.175	$12.224	0,40%
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	$14.230	$14.475	1,75%
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lodos Activados	$23.820	$25.229	5,91%

Como se puede observar el sistema lodo activado es el más sensible a variaciones en el costo energético, generando un aumento del OPEX de 5.91% cuando se incrementan los costos energéticos en un 30%. El sistema de humedal construido con aireación mecánica, al tener un componente energético relevante, pero menor, presenta un aumento del OPEX de 5.20%. Distinto es el caso para humedal sin aireación y sistema lombrifiltro, en que la variación del OPEX, son del orden de 0,4% y 1,75%. Respectivamente.

4.4.2. Variaciones en costos de operación y mantención

Como se ha señalado, los costos asociados al mantenimiento y operación también aparecen como relevantes en cada una de las tecnologías, los que van del orden de un 25% a un 40% del total de costos operacionales. Por ello y ante eventuales escenarios en que estos costos se modifiquen, se realiza el análisis con un incremento de esta partida del 25%.

Tabla 9: Sensibilidad OPEX ante alzas costos operación y mantenimiento

Fuente de información	Tecnología	OPEX M$	OPEX M$ C/ INCREMENTO 25% OP Y MANT	Variacion OPEX %
Proyecto 24BP 273014	Humedal Construido (con aireación mecánica)	$14.530,07	$15.894,76	9,4%
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lombrifiltro	$13.951,76	$14.857,75	6,5%
Estudio Soluciones Sanitarias Rurales, SUBDERE 2018	Lodos Activados	$22.389,05	$24.095,80	7,6%

Los resultados nos indican que el humedal construido es el sistema que se ve mayormente afectado por un incremento en un 25% de los costos relacionados con los servicios de operación y mantención, lo que se condice con su estructura de costos, donde esta partida es la que tiene una mayor participación entre los 3 sistemas, alcanzando un 38%. De esta manera al sensibilizar este

costo, como lo indica la tabla, el aumento del OPEX para el humedal construido alcanza un 9,4%, mientras que los sistemas de lodo activado y lombrifiltro, presentan un incremento más moderado de 7,6% y 6,5 %, respectivamente.

4.4.3. Escenario con restricciones de terreno o cambio de escala

Desde la perspectiva del uso de suelo, la disponibilidad de terreno constituye una de las principales restricciones para la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en proyectos de pequeña escala. En un escenario donde la superficie disponible se limita, por ejemplo, a 1.000 m², los resultados indican que tecnologías como el lombrifiltro y el humedal construido resultan viables. En contraste, las plantas de lodos activados no se presentan como una alternativa factible, dado que, según el estudio SUBDERE, requieren una superficie mínima del orden de 2.596 m² para una población de referencia de 100 personas, superando ampliamente la restricción planteada.

Por otra parte, al analizar los requerimientos de superficie del lombrifiltro, los antecedentes del estudio SUBDERE permiten observar que incluso una unidad diseñada para atender del orden de 2.000 personas presenta requerimientos de superficie de 2.376mts2, inferiores a los de una planta de lodos activados para 100 personas (2.596 mts2). Este comportamiento evidencia que las tecnologías convencionales, como los lodos activados, no resultan las más adecuadas para poblaciones pequeñas ni para contextos donde no existen proyecciones relevantes de crecimiento del sistema, particularmente cuando el terreno disponible es un factor limitante.

Desde una mirada complementaria, los humedales construidos sin aireación mecánica presentan un patrón distinto de crecimiento en sus requerimientos de superficie. Si bien resultan competitivos en escalas pequeñas, su tasa de ocupación de suelo aumenta significativamente a partir de las 500 personas, creciendo de manera acelerada a medida que se incrementa la población atendida. Este comportamiento sugiere que, en escenarios de mayor escala o con restricciones severas de terreno, los humedales pasivos podrían perder ventaja relativa frente a soluciones más compactas o configuraciones con aireación mecánica.

Un comportamiento distinto se observa en el caso de los humedales construidos con aireación mecánica, los cuales presentan requerimientos de superficie considerablemente menores en comparación con los humedales pasivos. Considerando una tasa de ocupación del orden de 0,5 m² por persona, una unidad diseñada para 2.000 personas requeriría aproximadamente 1.000 m² para la unidad de tratamiento, a lo cual se debería adicionar la superficie necesaria para obras anexas. No obstante, incluso incorporando estas áreas complementarias, el requerimiento total de superficie sería previsiblemente inferior al de una planta de lodos activados diseñada para la misma población, la cual, según antecedentes del estudio SUBDERE, alcanza un requerimiento del orden de 3.692 m².

Si bien la decisión final entre una u otra alternativa debería sustentarse en análisis completos de inversión y operación para distintas escalas de aplicación, los antecedentes aquí presentados permiten reforzar, a priori, la conveniencia de tecnologías como los humedales construidos y los lombrifiltros para poblaciones de pequeña y mediana escala, incluso en rangos de hasta 2.000

personas, particularmente en contextos donde la disponibilidad de suelo constituye una restricción relevante.

4.4.4. Escenario frente a variabilidad del efluente

En este contexto, los humedales construidos con aireación mecánica presentan una mayor capacidad de adaptación frente a escenarios de carga variable, en comparación con soluciones pasivas como los humedales sin aireación o los lombrifiltros. La incorporación de aireación controlada y, eventualmente, de sistemas de automatización básica, permite ajustar las condiciones de oxigenación del sistema, mejorando la estabilidad del proceso biológico y su respuesta frente a picos de carga orgánica o variaciones en la calidad del efluente. Esta característica resulta particularmente relevante para el tratamiento de riles industriales, donde la homogeneidad del afluente no siempre está garantizada.

Desde una perspectiva de sensibilidad, estos antecedentes sugieren que, frente a escenarios de alta variabilidad del afluente, los humedales construidos con aireación mecánica podrían resultar una alternativa más robusta y flexible, en relación a soluciones pasivas.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Fortalezas y debilidades de cada alternativa.

La tabla a continuación presenta un resumen de fortalezas y debilidades para las distintas tecnologías evaluadas en base a aspectos económicos, y otros elementos cualitativos evaluados.

TECNOLOGÍA	FORTALEZAS	DEBILIDADES
HUMEDAL CONSTRUIDO SIN AIREACIÓN MECÁNICA	• Bajo costo operacional y menor dependencia energética. • Operación simple y baja complejidad técnica. • Menor generación de lodos y residuos secundarios. • Buen desempeño económico (menor VAC) para pequeña escala. • Alineado con enfoques de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN).	• Mayor requerimiento de superficie respecto a tecnologías compactas. • Sensible a variaciones en la calidad y carga del afluente. • Menor aplicabilidad en contextos con restricciones de terreno. • Tecnología aún en proceso de mayor estandarización normativa.
HUMEDAL CONSTRUIDO CON AIREACIÓN MECÁNICA	• Requerimiento de superficie reducido respecto a humedales pasivos. • Costos operacionales intermedios. • Menor complejidad y riesgo operativo que lodos activados. • Mayor flexibilidad frente a variaciones de afluente.	• Mayor consumo energético que humedales sin aireación. • OPEX superior a soluciones pasivas. • Dependencia parcial de equipamiento electromecánico. • Costos de inversión eventualmente más altos por etapa de desarrollo de la tecnología (considerados en este estudio).
LOMBRIFILTRO	• Bajo consumo energético. • Menor CAPEX y VAC competitivo para pequeña escala. • Requerimientos de superficie moderados. • Tecnología conocida en el contexto nacional.	• Requiere manejo adecuado del sistema biológico. • Generación y manejo periódico de lodos. • Sensible a variaciones operacionales y de carga. • Mayor exigencia de control que humedales pasivos.
PLANTA DE LODOS ACTIVADOS	• Alto nivel de control del proceso. • Capacidad de tratar altas cargas orgánicas. • Tecnología ampliamente estandarizada.	• Alto CAPEX y OPEX. • Elevado consumo energético y alta sensibilidad a su precio. • Mayor complejidad operativa y técnica. • Menor resiliencia en pequeña escala y contextos rurales.

5.2 Recomendaciones finales en base al análisis comparativo

El análisis desarrollado permite concluir que la selección de tecnologías de tratamiento no debe basarse exclusivamente en los costos de inversión o en un único indicador económico, sino en una evaluación integral que considere costos de ciclo de vida, requerimientos de operación, uso de suelo, resiliencia frente a variaciones de costos y condiciones de borde territoriales y productivas. Bajo un enfoque de costo-eficiencia, el uso del Valor Actual de Costos (VAC) permitió comparar alternativas que entregan un nivel de servicio equivalente, identificando diferencias relevantes en su desempeño económico y operativo.

Los resultados muestran que, para una escala de referencia de 100 personas, las tecnologías de menor complejidad y menor dependencia energética presentan una mejor performance económica y mayor estabilidad frente a escenarios de alza de costos, mientras que las soluciones convencionales, como las plantas de lodos activados, exhiben mayores costos totales y una mayor sensibilidad a variables externas, particularmente el precio de la energía.

Los humedales construidos, tanto con cómo sin aireación mecánica, destacan por su simplicidad operativa, menor generación de lodos y menor dependencia energética, lo que se traduce en un desempeño económico competitivo y una mayor resiliencia frente a escenarios de incertidumbre. En particular, los humedales sin aireación presentan los menores costos operacionales y VAC para pequeña escala, mientras que los humedales con aireación mecánica se posicionan como una alternativa intermedia, reduciendo los requerimientos de superficie y mejorando la capacidad de respuesta frente a variaciones en la carga del afluente.

El lombrifiltro presenta un buen desempeño económico y bajo consumo energético, posicionándose como una alternativa adecuada para escalas pequeñas y medias, siempre que existan capacidades operativas para el manejo del sistema biológico y la gestión periódica de lodos.

Las plantas de lodos activados, si bien cuentan con un alto grado de estandarización y control del proceso, presentan mayores costos de inversión y operación, alta dependencia energética y mayores exigencias de gestión, lo que limita su conveniencia en proyectos de pequeña escala y en contextos con restricciones de terreno o financiamiento.

Desde la perspectiva de los tipos de usuario, los resultados indican que para pequeñas comunidades, sistemas APR y localidades rurales, donde las capacidades técnicas y financieras suelen ser acotadas y no existen proyecciones relevantes de crecimiento poblacional, las tecnologías basadas en procesos naturales, como humedales construidos y lombrifiltros, resultan más adecuadas debido a su simplicidad, estabilidad de costos y menor riesgo operativo.

En el caso de empresas productivas de pequeña y mediana escala, la elección tecnológica debe considerar adicionalmente la variabilidad del afluente, la disponibilidad de terreno y la necesidad de flexibilidad operativa. En este contexto, los humedales construidos con aireación mecánica emergen como una alternativa especialmente pertinente, al ofrecer una mayor capacidad de adaptación frente a cambios en la carga y composición de los riles, manteniendo costos y complejidad operativa inferiores a los de sistemas convencionales.

Para escalas mayores o escenarios con proyecciones significativas de crecimiento, tecnologías más intensivas podrían mejorar su desempeño relativo; sin embargo, ello debe evaluarse caso a caso mediante análisis específicos de inversión y operación para cada escala.

Si bien la evaluación económica se desarrolló utilizando supuestos asociados a aguas residuales domésticas, en consideración de información disponible comparable, los resultados obtenidos entregan insumos relevantes para el análisis de riles industriales, como los generados por la industria pisquera. En estos contextos, donde la carga del afluente puede presentar una mayor variabilidad y estacionalidad, resulta especialmente relevante priorizar tecnologías con mayor capacidad de adaptación y amortiguación de cargas, como los humedales construidos con aireación mecánica, complementados con etapas de pretratamiento cuando corresponda.

En este sentido, el proyecto Bien Público aporta evidencia relevante sobre el potencial de los humedales construidos como una solución técnicamente viable y económicamente competitiva para el sector productivo regional, abriendo oportunidades para su escalamiento, estandarización y eventual incorporación en instrumentos de fomento, particularmente en industrias de pequeña y mediana escala que enfrentan desafíos crecientes en materia de gestión hídrica y cumplimiento ambiental.

Los resultados del presente estudio ponen de manifiesto la necesidad de avanzar en el ámbito normativo, tanto para el sector comunitario, como para el sector productivo, de manera de generar condiciones habilitantes para la adopción de soluciones innovadoras. En particular, se releva la importancia de incorporar tempranamente a la autoridad sanitaria en los procesos de desarrollo, validación e implementación de tecnologías como los humedales construidos, con el fin de otorgar mayor certeza regulatoria respecto de las exigencias aplicables y los estándares de cumplimiento. Este trabajo conjunto resulta clave para promover efectivamente las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), evitando zonas grises normativas que desincentiven su adopción y avanzar hacia marcos regulatorios claros, proporcionales y coherentes con los objetivos de sustentabilidad, reúso del agua y adaptación al cambio climático.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos, se recomienda promover el uso de humedales construidos y lombrifiltros como soluciones preferentes para proyectos de pequeña escala, tanto en contextos comunitarios como productivos, fortaleciendo su validación técnica, normativa y económica. Asimismo, se sugiere profundizar el análisis para distintas escalas de población y tipos de efluente, incorporando pilotajes y evaluaciones específicas para riles industriales, con el fin de consolidar una cartera de soluciones tecnológicas adaptadas a las realidades territoriales y productivas de la región.

6. Bibliografía

Comisión Nacional de Riego. (2024). *Diagnóstico para el reúso de aguas servidas tratadas en el riego rural: Resumen ejecutivo.* Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.

Domínguez Díaz, V. (2022). *Evaluación del desempeño operacional de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas* (Memoria para optar al título de Ingeniera Civil). Universidad de Chile.

Dünner Turner, A. (2022). *Humedales construidos para el tratamiento de aguas servidas: Un caso de edificio en Viña del Mar* (Memoria para optar al título de Constructor Civil). Universidad Técnica Federico Santa María.

Gkika, D., Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2014). Construction and operation costs of constructed wetlands treating wastewater. *Water Science & Technology, 70*(5), 803–810. https://doi.org/10.2166/wst.2014.294

Guerrero Erazo, J., & Paredes Cuervo, D. (s. f.). *Análisis de costos para sistemas de tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales de flujo subsuperficial.* Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2025). *Metodología general para la formulación y evaluación de proyectos de inversión pública.* Sistema Nacional de Inversiones, Subsecretaría de Evaluación Social.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2000). *Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales* (Decreto Supremo N° 90). Diario Oficial de la República de Chile.

Ramajo, L., Goubanova, K., Rivadeneira, M., Astudillo, O., Ostría, E., Valladares, M., Ortiz, J. L., Barraza, J., Torrez, L., Barrera, S., Piña, B., Arthur, J., Gallardo, M. de los Á., Martínez, M. L., Ramírez, J., Guerrero, J., & Zavala, M. (2022). *AdaptaClim: Indicadores climáticos para la adaptación en la Región de Coquimbo.* Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA); Ministerio del Medio Ambiente de Chile; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente; Global Environment Facility.

Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2018). *Estudio de soluciones sanitarias para el sector rural.* Unidad de Saneamiento Sanitario, SUBDERE.

7. Anexos

Anexo 1 Listado entrevistados evaluación económica

Organización	*Nombre*	*Cargo*	*Modalidad*	*Objetivo de la reunión*	*Fecha Agendada*
APR Gualliguaica	Max jenschke	Presidente	Visita planta/ reunión on line	Conocer costos asociados, funcionamiento, y percepciones sobre la operatividad de la planta.	06-ago
Municiapalidad Monte Patria	Alejandra Sarmiento	Enc. Plantas de Tratamiento	Reunión On Line	Conocer costos asociados, funcionamiento, y percepciones sobre la operatividad de la planta.	12-ago
Municiapalidad Monte Patria	Víctor Vega	Operador PTAS	Visita planta	Conocer costos asociados, funcionamiento, y percepciones sobre la operatividad de la planta.	15-ago
INIA	Víctor Muñoz	Investigador	Reunión On Line	Profundizar sobre problemáticas asociadas al recurso hídrico, alternativas evaluadas y/o utilizadas por el sector agrícola.	19-ago
CDH Ingeniería	Alejandro Pérez	Subgerente Control de Gestión	Reunión On Line	Profundizar sobre conocimiento y/o aplicación de S.b.N en el sector y potencial de implementación Humedales construidos.	11-ago
Quitai Anko	Cristopher Vivanco	Investigador	Reunión On Line	Conocer sobre la experiencia de reutilización en APR de Gualliguaica.	08-ago
PTI Hortícola	Pedro Hernández	Investigador	Reunión On Line	Profundizar sobre problemáticas asociadas al recurso hídrico, alternativas evaluadas y/o utilizadas por el sector agrícola.	21-ago

-

Anexo 2: Pauta de entrevista – Evaluación Económica de Tecnologías de Tratamiento

PROYECTO CORFO 24BP 273014

Objetivo de la entrevista:

Recopilar antecedentes técnicos y económicos sobre el funcionamiento, costos y resultados de tecnologías de tratamiento de aguas residuales (lodos activados, lombrifiltro) a partir de la experiencia práctica de encargados o responsables de operación.

_____

1. Datos generales de la planta

- Nombre del sistema APR / Planta:
- Comuna y localidad:
- Tecnología principal utilizada:
- Año de construcción o puesta en marcha:
- Entidad operadora (APR, municipalidad, empresa, etc.):
- Número de personas beneficiadas / caudal promedio:

_____

2. Inversión inicial

- ¿Tiene noción del costo aproximado de inversión inicial (construcción, diseño, permisos)?
- ¿Qué entidades financiaron la construcción? (MOP, SUBDERE, FNDR, privados, etc.)
- ¿Hubo costos adicionales no considerados inicialmente?

_____

3. Costos de operación y mantenimiento

- ¿Cuáles son los principales gastos mensuales o anuales de la planta?

o Energía eléctrica

o Reposición de insumos (químicos, lombrices, etc.)

o Mantención de equipos

o Personal operativo

- ¿Qué cantidad de personas trabajan operando o manteniendo el sistema?
- ¿Existe algún apoyo externo (municipal, DOH, CEAZA u otro)?

_____

4. Gestión y monitoreo

- ¿Cada cuánto se realizan mantenciones o limpiezas?
- ¿Se mide la calidad del efluente? ¿Con qué frecuencia?
- ¿Tienen registros de parámetros como DBO, DQO, sólidos suspendidos, etc.?
- ¿Qué pasa con los residuos generados (lodos, fangos, lombrices, etc.)?

_____

5. Percepciones y evaluación

- ¿Qué tan eficiente considera que es el sistema en remover contaminantes?
- ¿Qué ventajas destacaría de esta tecnología frente a otras?
- ¿Cuáles han sido las principales dificultades u obstáculos en la operación?
- ¿Recomendaría esta tecnología para otras localidades similares? ¿Por qué?

_____

6. Sostenibilidad y proyecciones

- ¿Han evaluado o ejecutado acciones para mejorar la eficiencia o ampliar la cobertura?
- ¿Han recibido capacitación, asistencia técnica o mejoras posteriores a la construcción?
- ¿Visualiza este sistema como sostenible a largo plazo?

_____

7. Otros comentarios

- ¿Hay algún otro aspecto que quiera destacar sobre el funcionamiento de la planta?

Anexo 3: Fichas de Costos Tecnologías

COSTOS DE INVERSIÓN COSTOS DIRECTOS ($)	Lodo Activado	Lombrifiltro	Humedal Construido
Equipos	45.170.121	8.340.942	20.500.000
Obras Civiles	64.945.857	30.167.796	29.500.000
Tuberías	5.660.400	435.973	15.000.000
IIEE	35.720.746	2.581.810	18.750.000
Total Costos Directos ($)	**151.497.125**	**41.526.520**	**83.750.000**
COSTOS INDIRECTOS ($)			
Gastos Generales y Utilidades	59.765.616	16.382.212	33.039.375
Ingeniería	7.246.312	1.986.270	4.005.876
Inspección Técnica de Obras	9.908.223	2.715.920	5.477.422
Total Costos indirectos ($)	76.920.151	21.084.401	42.522.672
COSTOS TOTALES (2018) *	**228.417.276**	**62.610.922**	**126.272.672**
COSTOS TOTALES $ (2025)	**329.149.295**	**90.222.337**	**126.272.672**

COSTOS DE OPERACIÓN COSTOS DIRECTOS M ($)	Lodo Activado	Lombrifiltro	Humedal Construido
Productos químicos	107	266	61
Energía eléctrica	2.267	375	2520
Materiales y repuestos	2.556	459	990
Servicios de laboratorio	5.776	6.038	5000
Transporte y disposición de lodos	93	30	500
Servicios de operación y mantención	4.738	2.514	5458,75
Total Costos Operación ($)	**15.537**	**9.682**	**14.530**
COSTOS TOTALES $ (2025)	**22.389**	**13.952**	**14.530**