UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Departamento de Ingeniería Comercial
Departamento de Obras Civiles

GOBERNANZA Y REÚSO DE AGUAS SERVIDAS EN ANTOFAGASTA: PROPUESTA DE UNA PAUTA TÉCNICO-REGULATORIA Y DE FISCALIZACIÓN PARA UNA GESTIÓN HÍDRICA INTEGRADA

Miguel Ángel Orellana Tudela
MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA
OCTUBRE 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Gobernanza y reúso de aguas servidas en Antofagasta: Propuesta de una pauta técnico-regulatoria y de fiscalización para una gestión hídrica integrada.

Nombre del candidato(a): Miguel Ángel Orellana Tudela

Carrera / Grado: Magíster en Gestión del Agua – Master of Water Management

Campus: Vitacura **Departamento:** Ingeniería Comercial /Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Marcelo Bravo Fortune**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

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

Fecha: 26-10-2026 Firma:

Estudiante o Candidato(a)

Fecha: 26-10-2026 Firma:

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

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA
MWM MASTER OF WATER MANAGEMENT

Departamento de Ingeniería Comercial
Departamento de Obras Civiles

GOBERNANZA Y REÚSO DE AGUAS SERVIDAS EN ANTOFAGASTA. PROPUESTA DE PAUTA TÉCNICO-REGULATORIA Y DE FISCALIZACIÓN PARA UNA GESTIÓN HÍDRICA INTEGRADA

Tesis de magister presentada por
Miguel Ángel Orellana Tudela
Como requisito para optar al Grado de
MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA

Director de Tesis:
Mg. Marcelo Bravo Fortune
Octubre 2026

TÍTULO DE TESIS:

Gobernanza y reúso de aguas servidas en Antofagasta: Propuesta de pauta técnico-regulatoria y de fiscalización para una gestión hídrica integrada.

AUTOR:

MIGUEL ÁNGEL ORELLANA TUDELA

TRABAJO DE TESIS, presentando en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL AGUA – MASTER OF WATER MANAGEMENT de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Observaciones:

_____

_____

Mg. Marcelo Bravo Fortune.
Director de Tesis

Dra. Vivian Aranda Núñez.
Correferente Interno

Mg. José Verdugo Cerón.
Correferente Externo

Santiago, Octubre 2026

Todo el contenido, análisis, conclusiones y opiniones vertidas en este estudio son de mi exclusiva responsabilidad.

Nombre: Miguel Ángel Orellana Tudela

Firma: 

Fecha: Santiago, octubre de 2026

AGRADECIMIENTOS

Después de casi una década, volver nuevamente a las aulas universitarias fue una experiencia muy gratificante. Durante el desarrollo del programa, tuve la oportunidad de aprender de grandes profesores y compañeros, cuyas experiencias profesionales en distintos sectores enriquecieron profundamente este proceso. Agradezco a Dios y la vida por permitirme vivir esta etapa, que significó un importante desafío académico y personal, marcado por el esfuerzo, la constancia y muchos sacrificios.

Mis principales agradecimientos están dirigidos a mi esposa Yasna, y a mis hijos Benjamín y María Jesús, por comprender que muchas veces tuve que retomar los estudios pensando en construir un futuro mejor para todos. Como padre de una familia maravillosa, no siempre fue fácil compatibilizar el tiempo dedicado al trabajo, los estudios y la vida familiar. Hijos, si algún día leen estas palabras, espero haberles entregado un buen ejemplo y siempre recuerden que, con esfuerzo y perseverancia, los objetivos se pueden cumplir. Agradezco especialmente a mi esposa por acompañarme y comprenderme en los momentos más difíciles, cuando debía permanecer durante largas horas frente al computador. Gracias por tu paciencia, tu amor y tu apoyo incondicional.

También, quiero agradecer a mis padres y hermanos en Santiago, quienes siempre me recibieron con alegría cuando debía viajar desde Antofagasta para asistir a clases. A mi madre en especial, por emocionarse con cada llegada y entristecerse con cada regreso al norte, por todas esas conversaciones, risas y comidas compartidas que hicieron más llevadero este esfuerzo. A mis suegros, primos y tíos, gracias por acompañarme en más de una junta familiar y por brindarme siempre palabras de aliento y apoyo.

Agradezco a mi institución y a mi Jefatura por permitirme estudiar y otorgarme las facilidades necesarias para desarrollar actividades académicas. La experiencia adquirida en la SISS fue una motivación permanente para seguir creciendo profesional y académicamente. El agua es un recurso esencial que sostiene el equilibrio en todos los ámbitos de la vida, por lo que ha sido muy gratificante trabajar y estudiar en torno a este elemento vital.

Finalmente, quiero agradecerme a mí mismo por no rendirme y haber llegado hasta el final de esta etapa. Fueron muchos viajes desde Antofagasta a Santiago, noches de poco descanso y días en que debía permanecer atento en clases pese al cansancio. Hubo momentos difíciles, pero había que seguir avanzando con esfuerzo, perseverancia y la convicción necesaria para concretar este hermoso proceso.

RESUMEN EJECUTIVO

La escasez hídrica estructural de la Región de Antofagasta, la alta demanda de los sectores productivos y la descarga de volúmenes relevantes de aguas servidas tratadas (AST) justifican evaluar el reúso como fuente complementaria. Se analizó su factibilidad técnica y operacional y formuló una propuesta de pauta Técnico-Regulatoria y de Fiscalización para apoyar los sistemas sanitarios, la regulación, las responsabilidades y fiscalización. El enfoque fue exploratorio-descriptivo y aplicado, basado en la revisión bibliográfica y normativa, fichas documentales, antecedentes operacionales, experiencias comparadas y la caracterización de nueve sistemas regionales. La evaluación consideró 5 dimensiones: técnico-operacional, sanitario-ambiental, infraestructura, normativa-gobernanza y fiscalización-trazabilidad. Una primera ronda de consulta a especialistas, analizada mediante Delphi modificado, aportó convergencias cualitativas preliminares. La base regional de 2019 registró más de 41 Mm^3/año de AST: 67,5 % se descargó al mar, 32,3 % a cauces superficiales continentales y solo 0,27 % se destinó a riego. Estos datos confirman un reúso directo marginal, aunque constituyen una referencia histórica que debe actualizarse. La evaluación clasificó un sistema como favorable, cuatro como favorables condicionados y cuatro como desfavorables en su estado actual. Las plantas con tratamiento secundario y los usuarios próximos presentan mejores condiciones; los emisarios concentran mayor caudal, pero requieren tratamiento adicional, desinfección, conducción, inversión y demanda estable. El hallazgo central es que cumplir una norma de descarga no demuestra que el efluente sea apto para reúso. La propuesta adopta el criterio de calidad apta para el propósito: parámetros, barreras de seguridad y frecuencias de control definidos según uso final y exposición. Las brechas críticas son la falta de estándares integrales por uso, la incertidumbre jurídica sobre efluente, la fragmentación de permisos y competencias, la definición de responsabilidades, el financiamiento y la insuficiente trazabilidad hasta el usuario. La pauta estructura la decisión en cuatro componentes: evaluación técnico-sanitaria; habilitación regulatoria y gobernanza; fiscalización basada en riesgo; y clasificación final como favorable, favorable condicionada o no favorable. Cada iniciativa debe acreditar oferta estable, demanda real, calidad según uso, infraestructura, permisos, responsables, puntos de control, medición, contingencias y registros verificables. Se propone una ficha única, expediente actualizado y control de toda la cadena, incluida la restricción o suspensión del suministro ante riesgos. Se recomienda una implementación gradual, coordinada por una Mesa Regional de Reúso sin sustituir competencias legales, priorizando plantas con tratamiento secundario, demanda e infraestructura próxima. Reúso Salar del Carmen (hasta 900 l/s e inicio previsto para 2028) evidencia la escala del reúso industrial y la necesidad de control preoperacional. En conclusión, el reúso de AST en Antofagasta es factible, pero de manera diferenciada, gradual y condicionada. Su consolidación exige transformar antecedentes dispersos en una secuencia común de evaluación, fiscalización y mejora.

ABSTRACT

The structural water scarcity of the Antofagasta Region, the high demand from productive sectors, and the discharge of significant volumes of treated wastewater (TWW) justify assessing reuse as a complementary source. The research analysed its technical and operational feasibility and formulated a Technical-Regulatory and Oversight Guideline to support sanitation systems, regulation, responsibilities, and oversight. An exploratory-descriptive and applied approach was used, based on a literature and regulatory review, documentary records, operational background information, comparative experiences, and the characterisation of nine regional systems. The assessment considered five dimensions: technical-operational, sanitary-environmental, infrastructure, regulatory-governance, and oversight-traceability. An initial round of consultation with specialists, analysed using a modified Delphi method, provided preliminary qualitative convergences but no definitive statistical consensus. The 2019 regional database recorded 41 Mm^3/year of TWW: 67,5% was discharged to the sea, 32,3% to continental surface watercourses, and only 0,27% was used for irrigation. These data confirm marginal direct reuse, even though a historical reference exists and needs to be updated. The assessment classified one system as favourable, four as conditionally favourable, and four as unfavourable in their current state. Plants with secondary treatment and nearby users present better conditions; outfalls concentrate on the largest volumes but require additional treatment, disinfection, conveyance, investment, and stable demand. The central finding is that compliance with a discharge standard does not demonstrate that the effluent is suitable for reuse. The proposal adopts the fit-for-purpose quality criterion: parameters, safety barriers, and monitoring frequencies are defined according to the end use and exposure. The critical gaps are the lack of comprehensive standards by use, legal uncertainty regarding the effluent, the fragmentation of permits and competencies, the definition of responsibilities, financing, and insufficient traceability through to the end user. The guideline structures decision-making into four components: technical-sanitary assessment; regulatory enablement and governance; risk-based oversight; and final classification as favourable, conditionally favourable, or unfavourable. Each initiative must demonstrate stable supply, real demand, fit-for-use quality, infrastructure, permits, responsible parties, control points, measurement, contingencies, and verifiable records. A single project record, an updated dossier, and control of the entire chain are proposed, including restricting or suspending supply in the event of risks. Gradual implementation, coordinated by a Regional Reuse Board without replacing legal competencies, is recommended, prioritising plants with secondary treatment, nearby demand, and infrastructure. The Salar del Carmen Reuse Project (up to 900 l/s and planned start-up in 2028) demonstrates the scale of industrial reuse and the need for pre-operational control. In conclusion, TWW reuse in Antofagasta is feasible, but in a differentiated, gradual, and conditional manner. Its consolidation requires transforming dispersed background information into a common sequence of assessment, oversight, and improvement.

ÍNDICE

CAPITULO I: INTRODUCCION 13
CAPITULO II: ORIGEN, PROPÓSITO Y ALCANCES DEL ESTUDIO 16
CAPITULO III: OBJETIVOS 19
CAPITIULO IV: ESTADO DEL ARTE 21
4.1 ANTECEDENTES DEL ESTADO DEL ARTE 21
4.1.1 Review bibliográfico y aporte de asignaturas del MWM 22
4.1.2 Antecedentes del sistema de tratamiento de aguas servidas tratadas 25
4.1.2 Resultados del panel de expertos 38
4.1.3 Síntesis de la revisión 42
4.2 SUJETO DE ESTUDIO 43
4.3 MARCO TEORICO DEL ESTADO DEL ARTE 48
CAPITULO V: PROPUESTA METODOLOGICA 54
CAPITULO VI: APLICACIÓN METODOLOGICA 58
6.1 ANTECEDENTES Y ELEMENTOS CONCEPTUALES PARA LA APLICACIÓN. 58
6.2 CONSTRUCCIÓN DE LA PAUTA TÉCNICO- REGULATORIA Y DE FISCALIZACIÓN 65
6.3 ELEMENTOS BASE PARA UNA RUTA NORMATIVA E INSTITUCIONAL DEL REÚSO 67
6.4 PROTOCOLO DE APLICACIÓN Y REGLA DE DECISIÓN 70
6.4.1 Aplicación preliminar del modelo de evaluación 71
6.4.2 Integración e interpretación de resultados 74
6.5 ESTRATEGIA TÉCNICO-REGULATORIA Y DE FISCALIZACIÓN 76
CAPITULO VII: RESULTADOS 81
7.1 Resultado de la base empírica: priorización técnico-territorial 81
7.2 Resultado Metodológico: Hallazgos que definen los componentes de la pauta propuesta 83
7.3 Resultado Regulatorio: Cumplir una norma de descarga no acredita aptitud para reúso. 86
7.4 Resultado de Gobernanza: la viabilidad exige coordinación, responsabilidades y demanda estable. 86
7.5 Integración de los resultados en la propuesta de Pauta 87
7.6 Resultado aplicado: arquitectura y producto de pauta propuesta 89
CAPITULO VIII: CONCLUSIONES 91
8.1 Conclusión general y Respuesta al Problema de Investigación 91

8.2 Conclusiones de gobernanza y coordinación regional 94
8.3 Conclusiones para la fiscalización y la trazabilidad 95
8.4 Conclusiones para la priorización territorial en Antofagasta..... 95
8.5 Conclusiones económicas, ambientales y sociales 96
8.6 Conclusión final 98
CAPITULO IX: RECOMENDACIONES 100
9.1 Alcance y criterio de priorización 100
9.2 Recomendaciones institucionales y regulatorias 100
9.3 Recomendaciones técnicas, operacionales y de fiscalización 102
9.4 Recomendaciones para la priorización territorial 103
9.5 Recomendaciones económicas, ambientales y sociales 104
9.6 Seguimiento y evaluación de resultados..... 105
CAPITULO X:BIBLIOGRAFÍA 107
CAPITULO XI: WEBGRAFÍA 112
CAPITULO XII: GLOSARIO Y ACRÓNIMOS..... 113
CAPITULO XIII: ANEXOS 116
Anexo A: Revisión y clasificación de antecedentes documentales.
Anexo B: Situación actual del tratamiento en la Región de Antofagasta
Anexo C: Antecedentes normativos de calidad de descargas

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre conocimiento generado y alcance del estudio 17

Tabla 2. Conceptos y palabras clave para la construcción del estado del arte del reúso de aguas servidas tratadas 21

Tabla 3. Clasificación y aporte de las fuentes revisadas para el desarrollo de la investigación 23

Tabla 4. Aportes de las asignaturas del Magíster al desarrollo de la investigación 24

Tabla 5. Síntesis de barreras normativas, regulatorias y operacionales para el reúso de aguas servidas tratadas 30

Tabla 6. Mecanismos de gestión y coordinación para proyectos de reúso de AST 34

Tabla 7. Composición del panel analizado 39

Tabla 8. Matriz de convergencia Delphi/ Convergencias y materias pendientes identificadas en la primera ronda 40

Tabla 9. Priorización derivada de la primera ronda 41

Tabla 10. Lecciones aprendidas del análisis de experiencias de reúso de AST 43

Tabla 11. Delimitación general del sujeto de estudio 44

Tabla 12. Delimitación técnica por tipo de sistema 46

Tabla 13. Datos operacionales de sistemas regionales considerados 46

Tabla 14. Delimitación normativa aplicable a emisarios submarinos 47

Tabla 15. Delimitación ambiental y potencial de reúso en Antofagasta en el 2019 48

Tabla 16. Resumen de calidades de efluente en PTAS monitoreadas en el país 50

Tabla 17. Componentes de trazabilidad y preguntas de fiscalización para proyectos de reúso de AST 61

Tabla 18. Matriz de dimensiones, criterios e indicadores 65

Tabla 19. Preguntas y escala de valoración 66

Tabla 20. Pauta consolidada de evaluación 66

Tabla 21. Matriz consolidada de sistemas de tratamiento 67

Tabla 22. Clasificación técnico-operacional preliminar 68

Tabla 23. Ruta de decisiones regulatorias e institucionales 69

Tabla 24. Matriz RACI referencial para proyectos de reúso 69

Tabla 25. Protocolo de aplicación del modelo 70

Tabla 26. Regla preliminar de clasificación de viabilidad 71

Tabla 27. Tratamiento de la confiabilidad de la evidencia 71

Tabla 28. Aplicación preliminar de la pauta 72

Tabla 29. Fortalezas y debilidades por tipología 73

Tabla 30. Matriz de brechas y acciones de cierre 74

Tabla 31. Síntesis integrada de resultados 74
Tabla 32. Estrategia temporal de aprovechamiento regional 75
Tabla 33. Respuesta integrada al problema de investigación 75
Tabla 34. Lineamientos técnicos diferenciados según uso final 76
Tabla 35. Instrumentos del marco habilitante 77
Tabla 36. Gobernanza propuesta para la Mesa Regional de Reúso 78
Tabla 37. Hoja de ruta de implementación 78
Tabla 38. Cuadro de indicadores para seguimiento y fiscalización 80
Tabla 39. Esquema de fiscalización basado en riesgo 80
Tabla 40. Distribución regional del volumen de AST según destino 82
Tabla 41. Clasificación y brechas principales de los sistemas regionales 85
Tabla 42. Síntesis de los principales resultados integrados 85
Tabla 43. Condiciones habilitantes identificadas y función dentro de la viabilidad 87
Tabla 44. Interpretación de las relaciones que condicionan el problema de estudio 89
Tabla 45. Matriz de trazabilidad entre hallazgos y contenidos mínimos de la pauta 89
Tabla 46. Aplicación de la pauta por horizonte de implementación 90
Tabla 47. Implicancias económicas, ambientales y sociales 98
Tabla 48. Matriz de cumplimiento y trazabilidad de objetivos 99
Tabla 49. Matriz priorizada de recomendaciones para implementar la pauta 101
Tabla 50. Aplicación territorial recomendada 103
Tabla 51. Hoja de ruta propuesta para la implementación 105
Tabla 52. Indicadores mínimos de seguimiento 106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de los sistemas de tratamiento de aguas servidas urbanas 25
Figura 2. Volumen de aguas servidas tratadas al 2024 26
Figura 3. Destino de las aguas servidas tratadas en Chile 27
Figura 4. Clasificación de reúso directo AST 2024 27
Figura 5. Volumen de aguas residuales reutilizadas y porcentaje de reúso en países seleccionados. 37
Figura 5. Localización referencial de sistemas de tratamiento y disposición de aguas servidas en la Región de Antofagasta. 45
Figura 6. Mapa mental del estudio 51
Figura 7. Mapa conceptual de dimensiones y criterios de análisis para el reúso de AST. 52
Figura 8. Evolución del modelo teórico. 53
Figura 10. Carta Gantt de programación de las fases y actividades de la investigación .. 54
Figura 11. Esquema general del procedimiento para proyectos de reúso de AST. 59
Figura 12. Mapa de actores relevantes organizados en 4 pilares estratégicos. 59
Figura 13. Marco regulatorio institucional para la gobernanza del reúso de aguas servidas tratadas. 60
Figura 14. Operación, demanda y legitimidad territorial en proyectos de reúso de aguas servidas tratadas 60
Figura 15. Matriz diagnóstica de preguntas críticas para evaluar el modelo de reúso de aguas servidas tratadas 62
Figura 16. Secuencia metodológica para la formulación de la propuesta técnico-regulatoria y de fiscalización del reúso de AST. 63
Figura 17. Caudales de referencia de los sistemas analizados 68
Figura 18. Secuencia Funcional para habilitar un proyecto de Reúso 70
Figura 19. Puntaje preliminar de viabilidad por sistema 72
Figura 20. Prioridad de los ejes de implementación 79
Figura 21. Destino de las aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta, año 2019 82
Figura 22. Clasificación preliminar de los sistemas regionales de aguas servidas tratadas según su viabilidad para el reúso 84
Figura 23. Estructura funcional de la pauta derivada de los resultados de la investigación 88
Figura 24. Arquitectura de la Pauta Técnico-Regulatoria y de Fiscalización propuesta ... 92
Figura 25. Destino de las aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta 97

CAPITULO I

INTRODUCCION

La disponibilidad de agua constituye una condición crítica para el desarrollo territorial, social y productivo de la Región de Antofagasta. Su clima hiperárido, la limitada presencia de fuentes superficiales y la presión de los centros urbanos y actividades productivas obligan a complementar las fuentes convencionales con estrategias de eficiencia, diversificación y circularidad. En este contexto, el reúso de aguas servidas tratadas (AST) permite recuperar un flujo ya generado y vincular el saneamiento con objetivos de seguridad hídrica regional.

Las AST no deben ser entendidas únicamente como un efluente sujeto a disposición final. Cuando su calidad, tratamiento, conducción y uso son compatibles con el destino previsto, pueden constituir agua regenerada para aplicaciones industriales, urbanas, productivas o de riego. Esta aproximación responde a la gestión integrada de los recursos hídricos y a la economía circular, pues reconoce el valor del agua contenida en los sistemas de saneamiento y exige controlar el ciclo completo, desde la planta hasta el uso final autorizado.

Chile cuenta con infraestructura urbana de tratamiento consolidada. El informe de Gestión del Sector Sanitario 2024 señala que operaban 303 sistemas de tratamiento de aguas servidas urbanas, lo que evidencia capacidad para generar efluentes tratados. Sin embargo, disponer de caudal no equivale a contar con reúso efectivo: gran parte de los efluentes continúa asociada a descargas en cuerpos receptores. El desafío consiste, por tanto, en habilitar su aprovechamiento mediante condiciones técnicas, regulatorias y de control verificables.

La brecha es particularmente relevante en Antofagasta, donde minería, industria, áreas verdes y servicios urbanos podrían requerir agua sin calidad potable, pero con estándares adecuados para cada aplicación. La distancia entre fuente y usuario, continuidad de la demanda, tratamiento adicional, almacenamiento, conducción y costo energético determinan la factibilidad de cada alternativa. Por ello, el volumen disponible no basta para priorizar proyectos; debe evaluarse junto con la calidad requerida, la infraestructura, los riesgos y el modelo de operación.

El marco vigente regula de manera relevante el tratamiento y la disposición de efluentes, pero no entrega por si sola una ruta integral de reutilización El D.S. N.º 90 fija límites de emisión según el cuerpo receptor; su cumplimiento acredita las condiciones de descarga, pero no demuestra necesariamente aptitud para un uso posterior. La calidad para riego, procesos industriales, áreas verdes o usos con exposición humana deben definirse según riesgo y destino efectivo, considerando tratamiento complementario, barreras de seguridad y monitoreo.

La implementación enfrenta también una brecha de articulación institucional. Un proyecto puede requerir la intervención de empresas sanitarias, usuarios receptores, SISS, DGA, autoridad sanitaria, organismos ambientales, municipalidades y Gobierno Regional. La falta de una secuencia común para revisar permiso, responsabilidades y antecedentes puede generar demoras, interpretaciones divergentes o vacíos de control. La gobernanza es, por tanto, una condición habilitante para coordinar decisiones y asignar obligaciones durante todo el ciclo del proyecto.

La fiscalización exige ampliar el enfoque centrado en la descarga. En un sistema de reúso, la cadena de riesgo incorpora un tratamiento complementario, almacenamiento, transporte, punto de entrega, usuario receptor y uso final. Ello requiere puntos críticos de control, parámetros y frecuencias de seguimiento, medición de caudales, registros de entrega, protocolos de contingencia y criterios para restringir el suministro frente a desviaciones. Sin trazabilidad no es posible verificar que el recurso conserve las condiciones comprometidas hasta su utilización.

La viabilidad económica depende, además de una demanda estable. Las inversiones en tratamiento avanzado, desinfección, obras de almacenamiento, conducción y control requieren usuarios identificados y capacidad de sostener la operación. El proyecto de reúso Salar del Carmen ilustra esta relación, su operación proyectada para 2028 contempla tratamiento complementario y conducciones hacia usuarios mineros. El antecedente muestra el valor de articular oferta, infraestructura y demanda formalizada, sin reemplazar las autorizaciones y controles públicos necesarios.

Frente a estas condiciones, la investigación aborda el reúso de AST como un problema técnico, regulatorio, institucional y de fiscalización. La cuestión no se limita a establecer si existe caudal disponible, sino a determinar cuándo un efluente puede ser apto para uso especifico y como deben organizarse responsabilidades, autorizaciones y controles. Esta perspectiva sitúa el reúso dentro de una gestión hídrica integrada, donde la seguridad del uso final y la trazabilidad son tan relevantes como la disponibilidad del recurso.

El propósito de la tesina es proponer una Pauta Técnico-Regulatoria y de Fiscalización para el reúso de Aguas Servidas Tratadas en la Región de Antofagasta. La propuesta se fundamenta en la revisión de antecedentes técnicos, normativos, operacionales e institucionales, en la caracterización de la oferta y alternativas de disposición, en el análisis de brechas, y en la consulta a expertos. Su finalidad es ordenar la evaluación de iniciativas, identificar condiciones habilitantes y definir medidas de control, sin sustituir las competencias legales vigentes.

La pauta se organiza en módulos conectados. El módulo técnico-sanitario verifica la fuente, caudal, estabilidad de la oferta, calidad del efluente y tratamiento

adicional según uso previsto. El módulo regulatorio y de gobernanza revisa permisos, responsables y coordinación. El módulo de fiscalización incorpora indicadores, puntos de monitoreo, evidencias y respuesta ante desviaciones. Su integración permite clasificar cada iniciativa, identificar brechas y establecer condiciones, responsables y plazos para su implementación.

El estudio se circunscribe al contexto urbano y sanitario de la Región de Antofagasta y examina el reúso desde una perspectiva de factibilidad y gestión, sin desarrollar diseños de ingeniería de detalle. Los capítulos siguientes presentan el origen, alcance y objetivos del estudio; el estado del arte; la metodología; los resultados; las conclusiones y las recomendaciones. Así, la tesina busca aportar una base práctica para transformar un potencial hídrico subutilizado en proyectos seguros, autorizables, financiables y fiscalizables.

CAPITULO II

ORIGEN, PROPÓSITO Y ALCANCES DEL ESTUDIO

La investigación se desarrolla dentro de un conjunto de límites que permiten acotar su alcance y enfocar el análisis en aquellos aspectos más relevantes para el estudio del reúso de aguas servidas en la Región de Antofagasta. Estos límites se establecen en función de criterios geográficos, temáticos, institucionales, poblacionales y temporales, con el propósito de garantizar la coherencia y viabilidad del estudio. Reconociendo que esta delimitación responde a uno de los territorios más afectados por la escasez hídrica en Chile, donde el reúso de aguas servidas tratadas adquiere especial relevancia como alternativa para la gestión del recurso

El estudio se circunscribe a la Región de Antofagasta, considerando principalmente los sistemas de tratamiento de aguas servidas asociadas a las principales zonas urbanas de la región, específicamente en las empresas concesionarias encargadas del tratamiento de aguas servidas con sus plantas de tratamiento (PTAS), considerando su funcionamiento, capacidades y limitaciones desde una perspectiva global y sus actores principales como el sector público y regulador, gestores del agua, empresas sanitarias, otros organismos del Estado y tomadores de decisiones en materia hídrica. En este sentido, el estudio busca generar conocimiento aplicable para el diseño de políticas públicas y la mejora de la gestión del recurso hídrico.

El análisis se centra en las condiciones específicas de la región, tales como su clima árido, la disponibilidad limitada a fuentes hídricas y las características de su infraestructura sanitaria, pudiendo sus resultados tener implicancias a nivel nacional y en otros sectores, tales como la industria productiva, la minería, la agricultura y la población en general, los cuales son considerados de manera indirecta en el análisis. En este sentido, el análisis se limita a evaluar la viabilidad desde su implementación desde una perspectiva técnica, normativa y de gobernanza, sin abordar en profundidad otras fuentes alternativas como la desalinización o la gestión de aguas subterráneas, salvo como contexto general. Finalmente, el desarrollo considera las condiciones actuales del sistema sanitario y del contexto hídrico nacional, utilizando información reciente disponible al momento de la investigación. No se incluye un análisis histórico detallado ni proyecciones cuantitativas a largo plazo, aunque si se consideran tendencias generales asociadas al cambio climático y la evolución de la demanda hídrica.

Se considera como población afectada a los usuarios del sistema sanitario en la Región de Antofagasta, así como a los distintos sectores productivos que dependen del recurso hídrico. Sin embargo, no se realiza un análisis detallado del impacto social o percepción ciudadana, centrándose en aspectos técnicos, normativos e institucionales.

En coherencia con los limites previamente definidos, este estudio se enmarca en el ámbito del management de los recursos hídricos, abordando el reúso de aguas servidas tratadas desde una perspectiva integrada que articula dimensiones técnicas, normativas e institucionales, las que se resumen en la Tabla 1. Desde una perspectiva científica, la investigación adopta un enfoque exploratorio-descriptivo con componentes correlacionales y explicativos, lo que permite abordar el fenómeno de manera integral. El carácter exploratorio se justifica en la limitada integración existente entre los enfoques técnicos, regulatorios y de gobernanza en el contexto nacional, particularmente en relación con el reúso. A su vez, el enfoque descriptivo permite caracterizar el estado actual del sistema sanitario, considerando aspectos como la calidad de los efluentes, la infraestructura disponible y el marco normativo vigente.

Tabla 1. Relación entre conocimiento generado y alcance del estudio

Dimensión de conocimiento	Contenido/Qué se conoce	Alcance del Estudio (Aplicación)	Aporte a la investigación
Conocimiento técnico	Calidad del efluente, niveles de tratamiento, tecnologías disponibles	Evaluación de la factibilidad técnica del reúso en PTAS de Antofagasta	Determinar si el agua tratada es apta para la reutilización
Conocimiento normativo	Normativa sanitaria, ambiental y de recursos hídricos	Análisis del marco regulatorio vigente y sus limitaciones	Identifica vacíos legales y restricciones
Conocimiento de gobernanza	Actores institucionales, coordinación y toma de decisión	Evaluación de la articulación entre organismos (SISS, sanitarias, Estado)	Define barreras institucionales
Conocimiento del contexto hídrico	Escasez hídrica, cambio climático, demanda del agua	Justificación del reúso como alternativa estratégica	Fundamenta la necesidad del estudio
Conocimiento de infraestructura	PTAS, redes, sistemas de conducción	Análisis de capacidades operacionales para reúso	Identifica limitaciones físicas del sistema
Conocimiento de gestión	Planificación hídrica, eficiencia del sistema	Evaluación de la gestión del recurso hídrico	Permite identificar oportunidades de mejora
Conocimiento internacional	Experiencias y modelos de reúso en otros países	Comparación con el caso chileno	Apoya propuestas aplicables
Conocimiento metodológico	Criterios de evaluación técnica, normativa y de gobernanza	Aplicación de metodología para evaluar la viabilidad del reúso	Base para el análisis estructurado
Conocimiento estratégico	Seguridad hídrica, economía circular	Integración del reúso en políticas públicas	Proyección a largo plazo
Conocimiento aplicado	Resultados del análisis y diagnóstico	Desarrollo de propuesta técnico-regulatoria	Principal aporte de la tesina

Fuente: Elaboración propia.

El componente correlacional se manifiesta en el análisis de las relaciones entre variables técnicas, normativas e institucionales, las cuales influyen directamente en la viabilidad del reúso. Por su parte, el enfoque explicativo permite identificar las causas que limitan o facilitan su implementación, tales como los vacíos regulatorios, la fragmentación institucional y las condiciones operacionales del sistema. Desde el punto de vista profesional, el estudio tiene un carácter aplicado, orientado a generar insumos para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión del recurso hídrico, particularmente en organismos reguladores y entidades vinculadas al sector sanitario. En este sentido, la investigación busca contribuir al desarrollo de una propuesta técnico-regulatoria que permita fortalecer las condiciones para la implementación del reúso de aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta. De esta manera, el estudio no solo aporta al conocimiento académico, sino que también se posiciona como una herramienta práctica para mejorar la gestión del agua en un contexto de creciente escasez, promoviendo el reúso como una alternativa sostenible y estratégica dentro de la planificación hídrica.

CAPITULO III

OBJETIVOS

Se indica a continuación el objetivo general de la investigación, y los objetivos específicos, que representan las etapas del desarrollo metodológico del estudio. Estos se encuentran asociados a la recopilación y análisis de información técnica, normativa y operativa, así como a la aplicación de criterios de evaluación que permitan analizar la viabilidad del reúso de aguas servidas tratadas, considerando aspectos de calidad, infraestructura, regulación y gobernanza del recurso hídrico.

- **Objetivo general**

Evaluar la factibilidad técnica y operacional del reúso de aguas servidas, en las plantas de tratamiento de la comuna de Antofagasta, analizando la calidad del efluente, las brechas de tratamiento, los riesgos sanitarios y los requisitos adicionales necesarios para implementar un reúso seguro. Para apoyar la toma de decisiones sobre los proyectos y fortalecer la fiscalización y el control de las aguas servidas.

- **Objetivos específicos**

La secuenciación de los objetivos específicos refleja la propuesta metodológica con la cual desarrollaremos este trabajo de investigación.

1. Conocer la documentación escrita de los diferentes sistemas que permiten analizar la viabilidad técnica, normativa e institucional para el reúso de aguas servidas.

2. Comprender como se asocian los diferentes módulos del Magister del Agua en la elaboración de antecedentes que permitan proponer una solución concreta.

3. Levantar información en base a la experiencia de propuestas de reúso de empresas privadas dentro la zona.

4. Caracterizar el sujeto de estudio asociado al reúso de aguas servidas, delimitando el sistema sanitario, los actores involucrados y el contexto territorial e institucional donde se desarrolla.

5. Establecer un marco teórico que integre los conceptos de reúso de aguas servidas tratadas, gestión integrada de los recursos hídricos y

gobernanza del agua, con el fin de sustentar el análisis de su viabilidad en la Región de Antofagasta.

6. Recopilar y sistematizar la información técnica, normativa y operativa sobre el tratamiento y reúso de aguas servidas, a partir de fuentes primarias y secundarias, con el fin de sustentar el análisis del caso de estudio.

7. Definir criterios técnicos, regulatorios y de gobernanza que permitan evaluar la viabilidad del reúso de aguas servidas, considerando aspectos de calidad, infraestructura, normativa vigente y coordinación institucional.

8. Analizar el estado actual del tratamiento y disposición de aguas servidas, identificando las principales fuentes, volúmenes y niveles de tratamiento disponibles para su potencial reúso.

9. Identificar brechas regulatorias y oportunidades de mejora en la gobernanza del recurso hídrico

10. Aplicar un modelo de evaluación basado en la definición de criterios técnicos y de gobernanza, con el fin de determinar la viabilidad del reúso de aguas servidas.

11. Generar y definir resultados parciales que permitan identificar brechas, oportunidades y lineamientos para optimizar una implementación desde una perspectiva técnica y de gobernanza.

12. Sintetizar e interpretar los resultados parciales obtenidos, para generar como resultado final los fundamentos que permitan establecer el potencial de implementación de reúso de aguas servidas tratadas y sus implicancias en la gestión del recurso hídrico.

13. Generar conclusiones económicas, ambientales y sociales a partir de la viabilidad de generar propuestas de evaluación como la aplicada.

14. Proponer una estrategia técnico-regulatoria, basada en los resultados del análisis técnico y de gobernanza, que permita mejorar las condiciones normativas e institucionales para la implementación del reúso de aguas servidas tratadas.

CAPITIULO IV

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se aborda el estado del arte del reúso de aguas servidas tratadas, mediante una revisión y análisis de antecedentes técnicos, normativos, ambientales, institucionales y de gobernanza del agua, tanto a nivel internacional como nacional. Para ello, se consideró bibliografía especializada que incluye estudios sobre tecnologías de tratamiento, eficiencia del sector hídrico, planificación estratégica, resiliencia de infraestructuras, políticas públicas y marcos regulatorios.

4.1 ANTECEDENTES DEL ESTADO DEL ARTE

La Tabla 2 sistematiza los principales conceptos y palabras clave identificados para la revisión bibliográfica y documental, agrupándolos según las dimensiones que intervienen en el reúso de agua servidas tratadas. Esta síntesis permite ordenar los elementos que posteriormente estructuran el modelo conceptual de la investigación, relacionando la oferta de efluente tratado, los requisitos de calidad, la regulación aplicable, la gobernanza, la fiscalización y condiciones territoriales de la Región de Antofagasta.

Tabla 2. Conceptos y palabras clave para la construcción del estado del arte del reúso de aguas servidas tratadas

Concepto/Palabra Clave	Definición/Enfoque	Dimensión	Importancia de la Investigación
Reúso de Aguas Servidas Tratadas	Aprovechamiento de las aguas residuales previamente tratadas para nuevos usos	Técnica	Permite diversificar fuentes de agua y enfrentar la escasez hídrica
Gobernanza del agua	Conjunto de procesos, actores e instituciones que participan en la gestión del recurso hídrico	Institucional	Determinar la viabilidad de implementación del reúso
Marco regulatorio	Normas legales y técnicas que regulan el uso del agua y su calidad	normativa	Define condiciones, restricciones y vacíos legales del reúso
Calidad del efluente	Nivel de tratamiento y cumplimiento de estándares sanitarios del agua tratada	Técnica	Condición clave para habilitar el reúso seguro
Plantas de tratamiento de aguas servidas	Infraestructura encargada del tratamiento de aguas residuales	Técnica	Base operativa del sistema de reúso
Infraestructura sanitaria	Redes, sistemas de conducción y disposición del agua	Técnica	Permite o limita la distribución del agua reutilizada
Escasez hídrica	Disminución de la disponibilidad de agua en relación con la demanda	Contextual	Principal problema que justifica la investigación

Concepto/Palabra Clave	Definición/Enfoque	Dimensión	Importancia de la Investigación
Seguridad hídrica	Capacidad de asegurar disponibilidad y acceso sostenible al agua	Estratégica	Objetivo final del reúso
Economía circular del agua	Reutilización y valorización del agua como recurso	Ambiental	Permite cambiar la visión de residuo a recurso
Cambio climático	Variaciones climáticas que afectan la disponibilidad de agua	Ambiental	Aumenta la presión sobre recursos hídricos
Eficiencia hídrica	Uso óptimo del agua minimizando perdidas	Técnica/Gestión	Mejora la gestión del recurso
Resiliencia hídrica	Capacidad del sistema para adaptarse a crisis o cambios	Estratégica	Permite enfrentar eventos externos
Coordinación institucional	Articulación entre organismos públicos y privados	Gobernanza	Clave para implementar políticas de reúso
Actores del sistema hídrico	Instituciones como SISS, sanitarias y organismos públicos	Gobernanza	Influyen en la toma de decisiones
Regulación sanitaria	Normativa que asegura calidad y continuidad del servicio	Normativa	Base del control del sistema
Monopolio natural	Condición del sector sanitario que requiere regulación estatal	Económica	Justifica el rol del estado
Planificación hídrica	Estrategias de gestión del agua a largo plazo	Estratégica	Permite integrar el reúso en políticas publicas
Diversificación de fuentes	Uso de múltiples fuentes de agua	Estratégica	Reduce la dependencia de fuentes tradicionales
Evaluación de viabilidad	Análisis de factibilidad técnica, normativa y de gestión	Metodológica	Base del desarrollo de la tesina
Aceptación social	Percepción de la población respecto al reúso	Social	Condiciona la implementación del sistema

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Review bibliográfico y aporte de asignaturas del MWM

Para el review bibliográfico se presenta la clasificación de las fuentes revisadas según su nivel de profundidad y aporte al estudio, distinguiendo lecturas fundamentales, específicas y complementarias (Tabla 3). Esta organización permitió priorizar los antecedentes más pertinentes para sustentar el análisis del reúso de AST, la gobernanza hídrica y los criterios técnico-regulatorios y de fiscalización aplicables.

En la Tabla 4 se sintetizan los principales antecedentes recopilados desde las asignaturas del magíster para el desarrollo de la investigación, identificando su aporte al análisis en las dimensiones técnicas, normativas, institucionales y territoriales que sustentan la propuesta de la pauta.

El detalle de los documentos analizados, sus autores, año de publicación, clasificación y aporte específico o utilidad a la investigación se presenta en el Anexo A.

Tabla 3. Clasificación y aporte de las fuentes revisadas para el desarrollo de la investigación

N°	CITA	DESCRIPTOR
LECTURAS FUNDAMENTALES		
15	Gupta, J. et al. (2023).	"El concepto de gobernanza inclusiva del agua trasciende la participación formal, enfatizando la necesidad de que los actores tengan influencia real en la toma de decisiones. Este enfoque permite analizar críticamente las asimetrías de poder y su impacto en la distribución y gestión del recurso hídrico."
30	Zhang, W. et al. (2017).	"El reúso de aguas residuales tratadas se posiciona como una fuente estratégica para aumentar la disponibilidad de agua, requiriendo el desarrollo de marcos regulatorios claros, estándares de calidad adecuados y coordinación interinstitucional para su implementación sostenible."
19	Valdés-Pineda, R. et al. (2014)	"El sistema hídrico chileno presenta una alta fragmentación institucional y dificultades para priorizar usos del agua, lo que genera conflictos y limita la gestión integrada del recurso, especialmente en contextos de escasez hídrica."
35	Ballivián, P. (2018).	"El reúso de aguas servidas tratadas en Chile enfrenta importantes vacíos normativos, particularmente en relación con la propiedad, uso y regulación del recurso, lo que genera incertidumbre jurídica y limita su desarrollo como alternativa hídrica."
16	Stein, U. et al. (2023)	"Las herramientas de diagnóstico de gobernanza permiten identificar brechas institucionales y proponer instrumentos de política pública específicos, facilitando la coordinación intersectorial y mejorando la gestión del recurso hídrico."
17	Marqués, A. et al. (2022)	"La sostenibilidad hídrica puede evaluarse mediante indicadores de resiliencia, vulnerabilidad y confiabilidad, evidenciando que los sistemas de agua enfrentan mayores niveles de estrés bajo escenarios de cambio climático."
25	Haasnoot, M. et al. (2014).	"La planificación hídrica moderna requiere explorar múltiples escenarios futuros y trayectorias de adaptación, considerando la incertidumbre climática y la necesidad de decisiones flexibles."
37	Duhart, D. (2016).	"La institucionalidad hídrica chilena se caracteriza por una alta dispersión de competencias, lo que dificulta la coordinación entre organismos y la implementación de políticas integradas de gestión del agua."
LECTURAS ESPECIFICAS		
26	Lombardi, G. et al. (2019).	"El análisis de eficiencia mediante DEA permite evaluar el desempeño de empresas sanitarias considerando variables económicas, operativas y ambientales, identificando brechas en la gestión del recurso hídrico."
29	Cabrera, A. & Schwartz, K. (2025).	"Las empresas sanitarias deben equilibrar múltiples mandatos, incluyendo cobertura, sostenibilidad y viabilidad económica, lo que incrementa la complejidad de la gestión del agua."
28	Quintana, G. et al. (2020).	"La resiliencia de los sistemas de agua potable depende de su capacidad para anticipar, absorber y recuperarse frente a eventos disruptivos, integrando dimensiones técnicas, sociales e institucionales."
18	Charlton, M. & Arnell, N. (2011).	"El cambio climático constituye un factor determinante en la planificación hídrica, afectando el equilibrio entre oferta y demanda y condicionando las decisiones de inversión."
31	Kerrigan, G. (2025).	"Los sistemas de tratamiento de aguas servidas presentan limitaciones técnicas que afectan la calidad del efluente, lo que constituye una barrera para su reutilización segura."
34	Paucar, F. & Iturregui, P. (2020).	"El reúso de aguas residuales debe entenderse como una fuente alternativa de agua, enmarcada en la economía circular y en la necesidad de reducir la presión sobre fuentes naturales."
40	Estrategia Nacional del Agua (2024).	"La crisis hídrica en Chile responde a una brecha estructural entre oferta y demanda, agravada por debilidades en la gobernanza y la concentración de derechos de agua."
36	Sánchez, J. & Sanhueza, R. (2000).	"El sector sanitario chileno presenta características de monopolio natural, lo que justifica la regulación estatal para asegurar eficiencia, calidad del servicio y equilibrio entre intereses públicos y privados."

LECTURAS COMPLEMENTARIAS		
33	Salazar, P. (2023).	“Las aguas residuales pueden valorizarse como recurso estratégico, integrándose en procesos productivos y energéticos bajo un enfoque de economía circular.”
20	Prošek, J. et al. (2020).	“La teledetección permite mejorar significativamente la identificación y monitoreo de cuerpos de agua, contribuyendo a la gestión territorial del recurso hídrico.”
21	Frappart, F. et al. (2024).	“El uso de sensores satelitales mejora la estimación de niveles de agua, fortaleciendo la planificación y gestión de recursos hídricos.”
40	Song, X. et al. (2015).	“El análisis de sensibilidad global permite identificar los parámetros más relevantes en modelos hidrológicos, reduciendo la incertidumbre en la toma de decisiones.”
24	Devi, G. et al. (2015).	“Los modelos hidrológicos son herramientas fundamentales para simular el comportamiento del ciclo del agua y apoyar la planificación de recursos hídricos.”
22	Peña-Arancibia, J. et al. (2024).	“La integración de sensores remotos permite monitorear infraestructuras hídricas distribuidas, mejorando la gestión de cuencas.”

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Aportes de las asignaturas del Magíster al desarrollo de la investigación

Asignatura	Área de conocimiento	Aporte a la investigación	Aplicación en la Tesina
MWM550 Innovación y Gestión de Proyectos	Gestión de Proyectos	Entrega herramientas para estructurar	Desarrollo de una propuesta técnico-regulatoria
MWM540 Gestión de Clientes	Gestión de usuarios	Permite comprender la relación con los usuarios y aceptación del reúso	Consideración de percepción y aceptación social
MWM140 Riesgo y conflicto en la gestión de los recursos	Gestión de riesgos	Identificación de conflictos por uso del agua	Análisis de gobernanza y conflictos institucionales
MWM130 Eficiencia Hídrica	Uso eficiente del recurso	Entrega de criterios para optimizar el uso del agua	Justificación del reúso como alternativa eficiente
MWM530 Sistemas de gestión	Gestión organizacional	Permite analizar procesos y desempeño institucional	Evaluación de gestión en empresas sanitarias
MWM420 Gestión del sistema pluvial	Gestión de aguas urbanas	Completa visión integral del ciclo del agua	Contextualización del sistema hídrico urbano
MWM400 Gestión de redes	Infraestructura sanitaria	Entrega conocimientos sobre redes y distribución	Análisis de infraestructura para reúso
MWM500 Gobernanza y economía del agua	Gobernanza hídrica	Define roles, actores y toma de decisiones	Base del análisis institucional y regulatorio
MWM520 Finanzas y desarrollo de negocios	Evaluación económica	Permite evaluar viabilidad financiera (nivel general)	Contexto económico del reúso
MWM510 Planificación y Dirección Estratégica	Planificación	Entrega de herramientas para planificación de largo plazo	Integración del reúso en planificación hídrica
MWM120 Gestión y captación y tratamiento de agua	Tratamiento de agua	Base técnica de procesos de tratamiento	Evaluación de calidad del efluente
MWM100 Gestión y planificación de recursos hídricos	Gestión hídrica	Entrega enfoque integral del recurso	Marco conceptual del estudio
MWM110 Evaluación de los recursos	Evaluación técnica	Métodos para analizar disponibilidad de recursos	Evaluación de viabilidad del reúso
MWM410 Gestión de la depuración y reutilización	Reúso de aguas	Base directa del tema de investigación	Sustento técnico del reúso

Fuente: Elaboración propia.

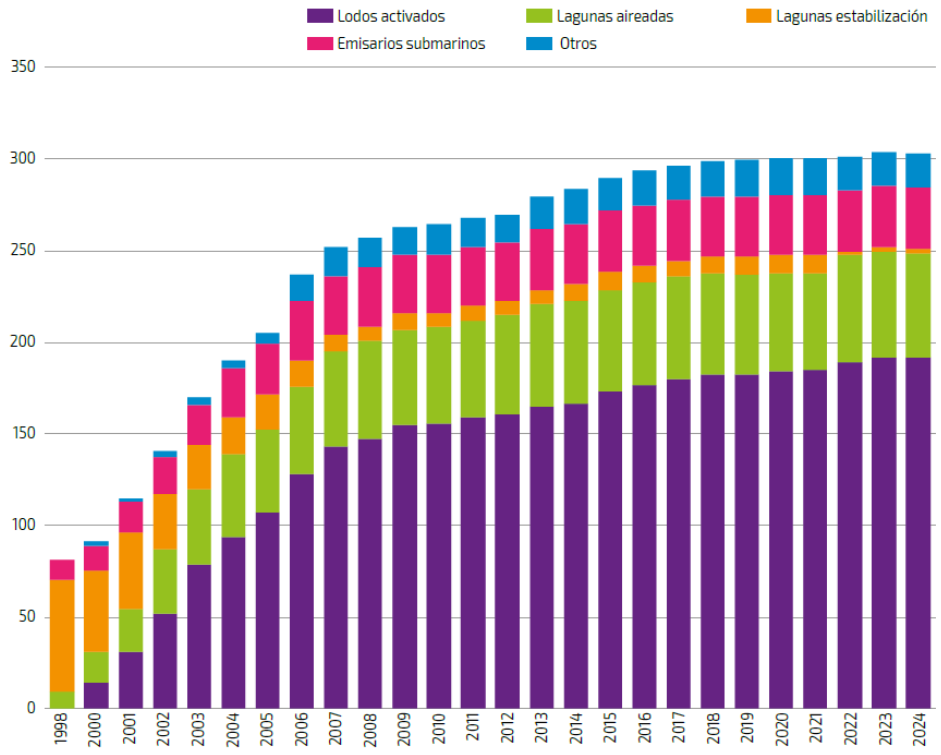
4.1.2 Antecedentes del sistema de tratamiento de aguas servidas tratadas

El tratamiento de aguas servidas tratadas se abordará desde tres ejes, el técnico, el normativo sobre la base de las brechas que existan, y de los mecanismos de coordinación y de gestión.

- **Tratamiento de aguas servidas tratadas**

Según el Informe de Gestión del Sector Sanitario 2024 de la SISS, la evolución de los sistemas de tratamiento de aguas servidas urbanas muestra una infraestructura consolidada y prácticamente estable en el último periodo (Figura 1). A nivel nacional en 2024 operaban 303 sistemas de tratamiento de aguas servidas tratadas en el sector urbano, manteniéndose el predominio de los sistemas que descargan a cuerpos de agua superficial sin dilución asociados a la Tabla 1 del D.S. N°90, representando el 71% de total. Le siguen los sistemas que descargan al mar fuera de la zona de protección litoral, asociados a la Tabla 5 del D.S. N°90, con un 11%, mientras que los sistemas destinados a riego representan un 3%. En términos tecnológicos durante 2024 se registró una disminución de un sistema basado en lagunas aireadas, tecnología que representa el 20% del total nacional.

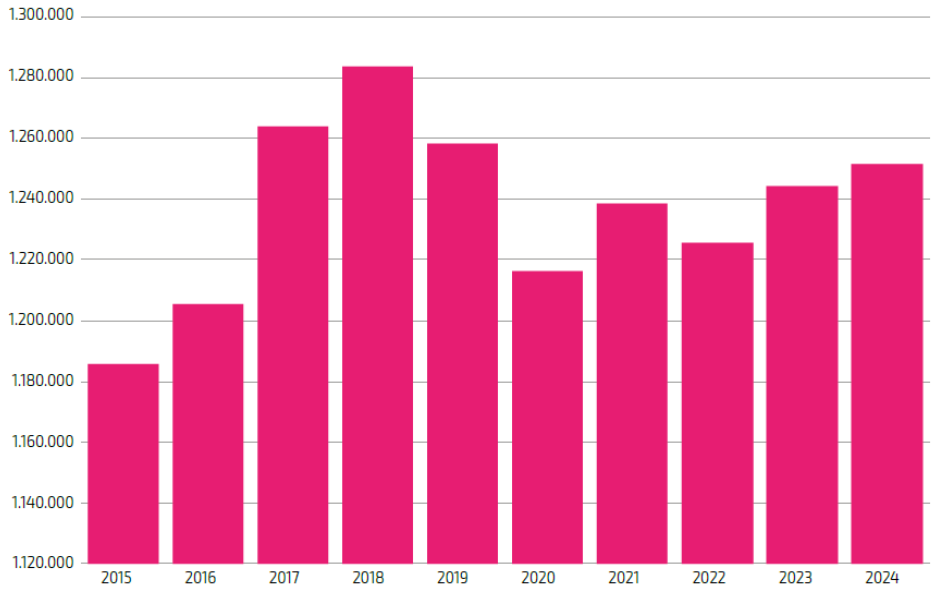
Figura 1. Evolución de los sistemas de tratamiento de aguas servidas urbanas



Fuente: Informe de Gestión del Sector Sanitario, SISS (2024).

En cuanto al desempeño, el volumen total de las aguas servidas tratadas alcanzó 1.252 millones de m3 al año, situándolo sobre el promedio de metros cúbicos en los últimos 10 años, el cual es de 1.237 millones de metros cúbicos (Figura 2).

Figura 2. Volumen de aguas servidas tratadas al 2024



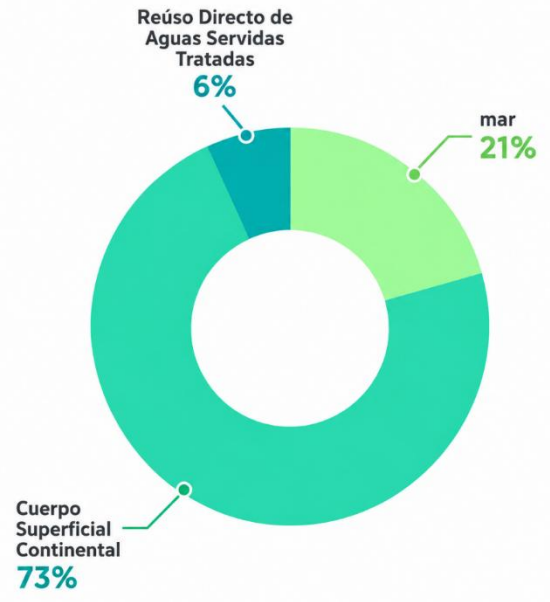
Fuente: Informe de Gestión del Sector Sanitario, SISS (2024).

No obstante, el destino del efluente evidencia una brecha relevante para el reúso (Figura 3): el 73% de las aguas servidas tratadas se descargó a cuerpos superficiales continentales, el 21% al mar y solo el 6% tuvo reúso directo, evidenciando un limitado aprovechamiento de estos efluentes como fuente alternativa de agua.

Finalmente, el cumplimiento normativo de las descargas alcanzó un 95,3%, aumentando respecto al año anterior, mientras que el 88% de los sistemas se encuentra afecto al D.S. N°4/2009 sobre manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas.

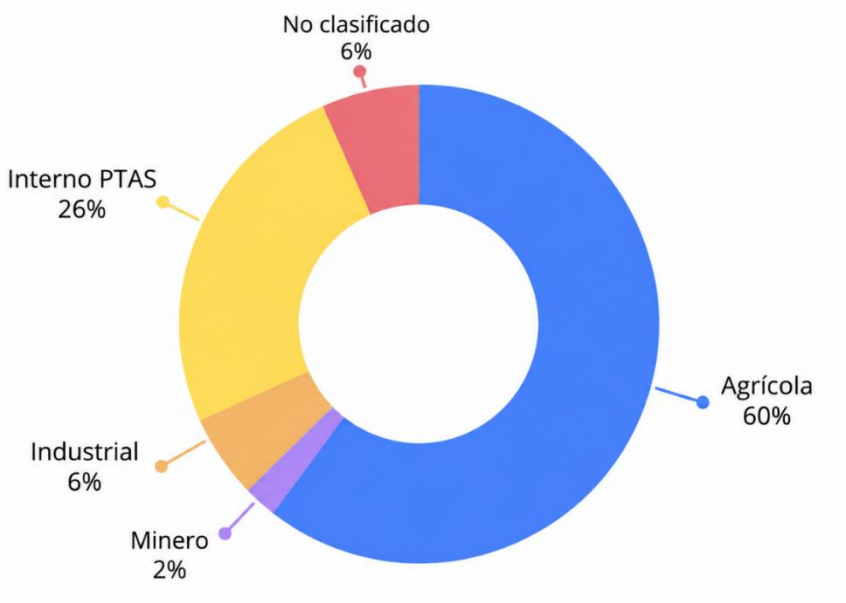
De acuerdo con las fuentes, el destino del agua reutilizada en Chile se distribuye principalmente en cuatro sectores (Figura 4), con variaciones según el año del reporte y la zona geográfica.

Figura 3. Destino de las aguas servidas tratadas en Chile



Fuente: elaboración propia con base al Informe de Gestión del Sector Sanitario (SISS, 2022)

Figura 4. Clasificación de reúso directo AST 2024



Fuente: elaboración propia con base al Informe de Gestión del Sector Sanitario (SISS, 2022)

Los principales destinos finales del agua reutilizada directamente son los siguientes:

- **Sector Agricola:** es históricamente el principal destino del agua reutilizada en el país, según el reporte más reciente de 2022, representa el 60% del volumen total del reúso. En años anteriores está cifra alcanzó el 62%.
- **Uso Interno en PTAS:** corresponde al agua que las propias plantas de tratamiento utilizan en sus procesos operacionales. Este destino ha mostrado un crecimiento importante, representando el 26% del reúso en 2024, frente al 20% reportado en 2022.
- **Sector Industrial:** aunque marginal en años previos (0,1% en 2022), para el cierre de 2024 se reportó un incremento significativo, alcanzando el 6% del destino de las AST.
- **Minería:** este sector utiliza el agua tratada principalmente en las regiones del norte para sus procesos productivos. Su participación ha variado en los registros, situándose en un 2% en 2024, aunque en 20222 se le atribuía un 18% del reúso directo.

Para enfrentar la escasez hídrica, el sector ejecutó en 2024 inversiones por MM$**1.036.079** (aprox. 1.044 millones de dólares) en obras de mitigación y seguridad, mientras que la desalación ya aporta el 1,5% de las fuentes totales del país. Un desafío crítico sigue siendo el Agua No Facturada de las fuentes totales del país (ANF) que alcanzó el 32,2% en 2024, estableciendo una meta de reducción a un 29% para el 2033. ACADES en su informe de **"Reúso de Aguas Residuales 2024"** destaca que, para aprovechar este potencial, es imperativo desarrollar estrategias integradas y regulaciones que otorguen certeza jurídica para fomentar la inversión en infraestructura de transporte de aguas servidas tratadas.

- **Barreras para la implementación de las aguas servidas tratadas**

Resulta fundamental identificar las principales barreras normativas y regulatorias que pueden limitar o condicionar la implementación de las AST. Si bien el reúso aparece como una alternativa estratégica frente a la escasez hídrica, su desarrollo depende de la existencia de reglas claras respecto de la propiedad del efluente tratado, los estándares de calidad exigibles según su uso final, los permisos sectoriales requeridos, las autorizaciones sanitarias, la evaluación ambiental los derechos de agua, las responsabilidades operacionales y los mecanismos de fiscalización. En este sentido, la revisión de estas barreras permite determinar si las experiencias analizadas enfrentan vacíos normativos, superposición de competencias o falta de criterios específicos que dificulten la materialización de proyectos de reúso de AST en la Región de Antofagasta.

En el caso de Chile, el reúso de AST se ha desarrollado principalmente dentro del ciclo sanitario urbano, especialmente en la etapa de disposición de aguas servidas, sin embargo, la normativa vigente ha estado históricamente orientada al tratamiento y descarga del efluente, más que a su valorización como fuente alternativa de agua.

En este contexto, las principales barreras identificadas se relacionan con la ausencia de una normativa específica e integral para el reúso de AST, si bien existen normas de emisión, normas sanitarias, legislación de servicios sanitarios, Códigos de Aguas, normativa ambiental y referencias técnicas de calidad, estas no conforman un marco único que regule de manera completa el reúso de AST.

Adicionalmente, se identificaron otras barreras bajo este contexto, tales como la falta de certeza respecto de la titularidad o facultad de disposición del efluente tratado , la interacción con los derechos de aprovechamiento de aguas, aguas debajo de los puntos de descarga, la inexistencia de estándares diferenciados de calidad según uso final, la necesidad de autorizaciones sanitarias y ambientales, la definición de responsabilidades de operación y mantenimiento y la articulación entre organismos con competencias sectoriales. Todas estas barreras adquieren especial relevancia en la Región de Antofagasta, donde coexisten sistemas de tratamiento secundario, emisarios submarinos, usos industriales y mineros potenciales, y una condición estructural de escasez hídrica que hace del reúso una alternativa estratégica.

Una normativa específica debería abordar, al menos, los siguientes elementos: definición de aguas servidas tratadas reutilizables; titularidad o facultad de disposición del efluente; tipos de reúso permitidos; estándares de calidad según uso final; permisos requeridos; responsabilidades del generador, operador y usuario; reglas para conducción y almacenamiento; obligaciones de monitoreo; trazabilidad de volúmenes; fiscalización; relación con derechos de aguas, aguas abajo; financiamiento; condiciones tarifarias; y mecanismos de información pública.

La ausencia de esta regulación obliga a que los proyectos se desarrollen caso a caso, mediante interpretaciones administrativas, contratos privados, exigencias sectoriales dispersas y criterios técnicos no siempre uniformes. Esto limita la escalabilidad del reúso, aumenta la incertidumbre para inversionistas y dificulta la planificación regional. En consecuencia, la barrera normativa no debe entenderse solo como una restricción legal, sino como un factor estructural que condiciona la viabilidad técnica, económica e institucional del reúso de AST. La Tabla 5 sistematiza las principales barreras jurídicas, normativas, técnicas y tarifarias identificadas, analizando su efecto sobre el reúso y su aplicación concreta en la Región de Antofagasta. Un análisis global se indica en el Anexo B.

Tabla 5. Síntesis de barreras normativas, regulatorias y operacionales para el reúso de aguas servidas tratadas

N°	Barrera identificada	Descripción sintética	Efecto sobre el reúso de AST	Aplicación al caso Antofagasta
1	**Ausencia de normativa específica de reúso de AST**	No existe un marco legal integral que regule de forma expresa el reúso de aguas servidas tratadas según tipo de uso.	Genera incertidumbre jurídica, técnica y administrativa para formular proyectos.	Limita la posibilidad de escalar experiencias de reúso industrial, minero, municipal o de riego.
2	**Titularidad o dominio del efluente tratado**	No existe certeza plena sobre quién puede disponer, vender, ceder o comercializar el agua servida tratada.	Dificulta contratos de suministro, modelos de negocio e inversión privada.	Afecta proyectos con usuarios industriales o mineros, especialmente cuando el efluente se pretende vender o entregar a terceros.
3	**Derechos de agua y usuarios aguas abajo**	Las descargas a cauces pueden estar incorporadas a balances hídricos y ser utilizadas por terceros.	El reúso directo puede afectar derechos existentes o generar conflictos entre usuarios.	Es relevante para sistemas interiores como Calama, Baquedano o Sierra Gorda, donde el efluente puede tener relación con cauces, riego o infiltración.
4	**Falta de información oficial de derechos y usos**	No siempre existe información actualizada sobre derechos de aprovechamiento, captaciones y usos mínimos aguas abajo.	Impide determinar qué volúmenes pueden reutilizarse sin afectar a terceros.	Dificulta evaluar la disponibilidad real de AST en sistemas que descargan a cuerpos continentales.
5	**Criterios de calidad del efluente tratado**	Las normas actuales regulan principalmente la descarga, no la calidad requerida para cada tipo de reúso.	Un efluente puede cumplir el D.S. N°90/00 y aun así no ser apto para riego, uso urbano, industrial o minero.	Es clave para diferenciar sistemas con lodos activados, lombrifiltro y emisarios submarinos.
6	**Autorizaciones sanitarias**	Los usos con contacto humano directo o indirecto requieren control sanitario específico.	Puede restringir usos como riego de áreas verdes, espacios públicos o aplicaciones urbanas.	Relevante para proyectos municipales, riego urbano y reutilización en zonas con exposición pública.
7	**Permisos y evaluación ambiental**	Nuevas plantas, impulsiones, estanques, redes o modificaciones de sistemas pueden requerir ingreso al SEIA u otros permisos.	Aumenta plazos, costos e incertidumbre de aprobación.	Aplica a alternativas de tratamiento centralizado, descentralizado, conducción a La Negra o uso minero.
8	**Competencias institucionales dispersas**	Intervienen SISS, DGA, MINSAL, MMA, SMA, DIRECTEMAR, municipios, GORE y otros actores.	Puede generar duplicidad de exigencias, vacíos de control o falta de coordinación.	La diversidad de actores regionales exige una gobernanza clara para proyectos de reúso.
9	**Fiscalización y trazabilidad**	No existe un sistema homogéneo para controlar origen, volumen, calidad, destino y uso final del agua reutilizada.	Dificulta verificar cumplimiento y asegurar uso seguro del efluente.	Es necesario para controlar entregas a industrias, minería, áreas verdes o usuarios municipales.
10	**Responsabilidad de operación y mantenimiento**	Debe definirse quién opera, mantiene, controla calidad, gestiona lodos, olores y contingencias.	La falta de responsables claros aumenta riesgos operacionales y sanitarios.	Especialmente relevante en sistemas descentralizados o de menor escala, como Coloso, Baquedano y Sierra Gorda.
11	**Gestión de lodos, olores y subproductos**	El tratamiento adicional puede aumentar generación de lodos, olores o residuos operacionales.	Puede generar rechazo social, costos adicionales y exigencias sanitarias o ambientales.	Crítico en alternativas de nuevas PTAS o ampliación de tratamiento secundario en zonas urbanas.
12	**Infraestructura de conducción y almacenamiento**	El efluente tratado debe trasladarse desde la PTAS o emisario hacia el usuario final.	Las distancias, impulsiones, estanques y redes elevan costos de inversión y operación.	Es una barrera relevante para conducir agua hacia La Negra, minería, áreas verdes o nuevos usuarios.
13	**Financiamiento y tarifas**	No está claramente definido quién debe pagar el tratamiento adicional, conducción, monitoreo y operación.	Riesgo de trasladar costos a usuarios sanitarios que no reciben el beneficio directo.	Debe evitarse que usuarios residenciales financien proyectos cuyo beneficio principal sea industrial o minero.
14	**Modelo de negocio insuficientemente definido**	Falta claridad sobre precios, contratos, duración, garantías de caudal, calidad y continuidad del suministro.	Reduce interés de inversionistas y usuarios potenciales.	La Negra y el sector minero requieren contratos estables y seguridad de abastecimiento.
15	**Demanda efectiva o usuario ancla**	Sin un usuario dispuesto a pagar por el agua tratada, el proyecto puede ser	La inversión no se justifica si no existe demanda firme.	Minería, industria y municipios pueden actuar como usuarios ancla, pero deben comprometer demanda real.

		técnicamente posible pero económicamente inviable.		
16	**Diferencia entre descarga marina y reúso**	Los emisarios submarinos están diseñados para disposición y dilución, no para producir agua reutilizable.	Recuperar esas aguas exige tratamiento secundario o terciario adicional.	Es una barrera clave en Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla.
17	**Aceptación social y percepción pública**	El reúso puede enfrentar rechazo por riesgos sanitarios percibidos o falta de información ciudadana.	Puede limitar proyectos de riego urbano, áreas verdes o usos con exposición pública.	Requiere educación, transparencia, monitoreo visible y comunicación de beneficios.
18	**Planificación territorial insuficiente**	El reúso requiere compatibilizar infraestructura, usuarios, distancias, uso de suelo y crecimiento urbano.	Puede dificultar la ubicación de plantas, redes, estanques y puntos de entrega.	Es relevante para Antofagasta por su topografía, expansión urbana y localización de usuarios industriales.
19	**Brecha entre tratamiento y valorización del recurso**	Chile presenta alta cobertura de tratamiento, pero bajo reúso directo.	El sistema sanitario cumple con tratar, pero no necesariamente con reutilizar.	Antofagasta dispone de AST, pero gran parte se descarga al mar o se usa marginalmente.
20	**Falta de gobernanza integrada**	No existe una estructura clara que coordine actores, permisos, demanda, financiamiento, fiscalización y operación.	Los proyectos quedan fragmentados y dependen de gestiones caso a caso.	La región requiere una coordinación entre SISS, sanitaria, ECONSSA, TRATACAL, DGA, MINSAL, DIRECTEMAR, GORE, municipios y usuarios productivos.

Fuente: *elaboración propia.*

- **Mecanismos de gestión y coordinación.**

El análisis permite establecer que la implementación de cualquier tipo de iniciativa requiere de mecanismos de gestión y coordinación que articulen de manera efectiva a los actores públicos, privados y comunitarios involucrados. En este sentido, el reúso de AST no puede ser abordado únicamente como una solución técnica asociada a una planta de tratamiento, sino como un proceso de gestión integrada que involucra infraestructura sanitaria, disponibilidad de efluente, demanda potencial, permisos sectoriales, estándares de calidad, financiamiento, operación, fiscalización y aceptación social.

A partir de los antecedentes revisados, se observa que los proyectos de reúso presentan mayores posibilidades de implementación cuando existe una coordinación temprana entre el generador del efluente tratado, el operador sanitario, los usuarios potenciales, los organismos fiscalizadores y las instituciones públicas con competencias ambientales, sanitarias, hídricas y territoriales. Esta coordinación permite reducir incertidumbres respecto de la propiedad o disponibilidad del efluente, definir el uso final del agua tratada, establecer criterios de calidad, determinar responsabilidades operacionales y estructurar modelos de financiamiento acordes con los beneficios esperados.

En el caso de la Región de Antofagasta, los mecanismos de gestión y coordinación adquieren especial relevancia debido a la coexistencia de sistemas con características distintas. Por una parte, existen sistemas costeros asociados a emisarios submarinos, donde el principal desafío consiste en transitar desde una lógica de disposición marina hacia una lógica de recuperación y valorización del efluente. Por otra parte, existen plantas de tratamiento interiores o de menor escala, como Calama, Baquedano, Sierra Gorda o San Pedro de Coloso, donde el reúso

puede orientarse a riego de áreas verdes, usos urbanos controlados, uso industrial o eventualmente uso productivo local. En ambos casos, la coordinación institucional resulta fundamental para evitar que los proyectos dependan únicamente de acuerdos aislados o interpretaciones caso a caso.

Uno de los mecanismos más relevante corresponde a la conformación de una instancia de coordinación interinstitucional, ya sea bajo la forma de mesa técnica regional, comité de seguimiento o instancia de gobernanza del reúso. Esta instancia debería reunir, al menos a la SISS, Aguas Antofagasta, ECONSSA, TRATACAL, DGA, DOH, SEREMI de Salud, Ministerio de Medio Ambiente, DIRECTEMAR, Gobierno Regional, municipios y usuarios potenciales, tales como empresas mineras, industrias o administradores de áreas verdes. Su función principal sería ordenar la información disponible, priorizar iniciativas, definir responsabilidades, coordinar permisos y establecer criterios comunes para evaluar la viabilidad técnica, sanitaria, ambiental y económica en cada proyecto.

Un segundo mecanismo corresponde a la identificación de usuario ancla o demandantes estratégicos. Las experiencias revisadas muestran que el reúso requiere una demanda efectiva que justifique las inversiones en el tratamiento adicional, conducción, almacenamiento, monitoreo y operación. En Antofagasta, los usuarios con mayor potencial corresponden a la minería, la industria, el Barrio Industrial La Negra, los municipios para riego de áreas verdes y eventualmente, proyectos ambientales o de recuperación territorial. La existencia de usuarios ancla permite estructurar contratos de plazo fijo, distribuir costos, asegurar continuidad de demanda y reducir el riesgo financiero del proyecto.

Un tercer mecanismo de coordinación corresponde a la definición de acuerdos contractuales o convenios de suministro. Estos instrumentos deben establecer claramente el origen del agua tratada, el caudal disponible, la calidad comprometida, la frecuencia de monitoreo, las responsabilidades de operación y mantención, los puntos de entrega, las condiciones de interrupción, los costos asociados y las obligaciones del usuario final. En ausencia de una normativa específica para el reúso de AST, estos instrumentos adquieren especial importancia, ya que permiten entregar certeza operacional y económica a las partes involucradas.

Desde el punto de vista técnico-operacional, requiere un mecanismo de gestión basado en la trazabilidad del efluente tratado. Esto implica disponer registros de caudales generados, volúmenes reutilizados, parámetros de calidad, destino final, usuario receptor, uso declarado y condiciones de operación. La trazabilidad es fundamental para diferenciar el reúso directo de la simple disposición del efluente, permitiendo a los organismos fiscalizadores verificar que el agua tratada sea utilizada conforme al uso autorizado y bajo condiciones sanitarias ambientales y controladas.

Asimismo, la coordinación debe incorporar un mecanismo de definición de estándares de calidad según uso final. No todos los usos requieren la misma calidad

de agua tratada. El riego de áreas verdes con acceso público, el uso industrial, el uso minero, el riego agrícola, el reúso ambiental o la recarga de acuíferos presentan distintos niveles de exposición, riesgos sanitarios y exigencias técnicas. Para ello, cada proyecto debe definir previamente el estándar del efluente requerido, los procesos de tratamiento necesarios, los parámetros críticos, la frecuencia de control y las medidas de contingencia ante incumplimientos,

Otro mecanismo clave corresponde a la coordinación de permisos y autorizaciones sectoriales. Dependiendo del tipo de proyecto, pueden intervenir la SISS, la autoridad sanitaria, el sistema de evaluación ambiental, la DGA, DIRECTEMAR, municipios, Gobierno Regional u otros organismos. Para evitar duplicidades, vacíos o retrasos, se requiere una ruta de permisos clara, que identifique desde el inicio que autorizaciones son necesarias, que antecedentes deben presentarse, que organismo lidera cada revisión y que condiciones deben cumplirse para la operación del sistema.

En materia de financiamiento, los mecanismos de gestión deben permitir diferenciar entre proyectos de beneficio público, proyectos de beneficio privado y proyectos mixtos. En aquellos casos donde el reúso se destine principalmente a usuarios industriales o mineros, resulta razonable que dichos usuarios participen en el financiamiento de las obras necesarias, especialmente conducción, almacenamiento, tratamiento adicional o adaptación de procesos. En cambio, cuando el reúso tenga fines ambientales, áreas verdes públicas o seguridad hídrica territorial, pueden evaluarse esquemas de financiamiento público, regional o mixto. Esta definición es relevante para evitar que los costos de los proyectos con beneficios específicos sean trasladados íntegramente a usuarios sanitarios residenciales.

La gestión del reúso también requiere mecanismos de coordinación para la operación y mantenimiento. En cada experiencia se debe establecer quien será responsable de operar cada planta, realizar el tratamiento adicional, administrar los estanques, mantener las redes, controlar olores, gestionar lodos, ejecutar monitoreos, informar contingencias y responder ante incumplimientos de calidad. Esta definición es especialmente importante en modelos descentralizados o en sistemas menores, donde la falta de capacidades operacionales puede afectar la continuidad del reúso y generar riesgos sanitarios o ambientales.

Finalmente, los mecanismos de coordinación deben incorporar participación y comunicación con comunidades y usuarios. La aceptación social es una condición relevante para proyectos de reúso, especialmente cuando se vinculan con riego de espacios públicos, áreas verdes, usos urbanos o actividades con posible exposición humana. La entrega de información clara sobre la calidad del agua, controles sanitarios, beneficios ambientales, reducción de presión sobre fuentes naturales y medidas de seguridad permite disminuir percepciones negativas y fortalecer la legitimidad territorial de los proyectos.

En síntesis, los mecanismos de gestión y coordinación para el reúso de AST en Antofagasta deben estructurarse en torno a una gobernanza regional de reúso, capaz de integrar actores, información, permisos, financiamiento, estándares de calidad, trazabilidad y operación. Esta coordinación es fundamental para avanzar desde experiencias puntuales hacia una estrategia regional de reutilización de aguas servidas tratadas, orientada a la seguridad hídrica, la economía circular y el uso eficiente del recurso en una región sometida a condiciones estructurales de escasez. En la Tabla 6 se exponen los mecanismos de gestión, coordinación interinstitucional y trazabilidad requeridos para articular a los actores públicos y privados en los proyectos de reúso de efluentes.

Tabla 6. Mecanismos de gestión y coordinación para proyectos de reúso de AST

Mecanismo	Objetivo principal	Actores involucrados	Aplicación en Antofagasta
Mesa técnica regional de reúso	Coordinar actores, priorizar proyectos y definir criterios comunes de evaluación.	SISS, GORE, municipios, Aguas Antofagasta, ECONSSA, TRATACAL, DGA, DOH, SEREMI de Salud, MMA, DIRECTEMAR, usuarios productivos.	Permite ordenar iniciativas en Antofagasta, Calama, Mejillones, Taltal, Tocopilla, Baquedano, Sierra Gorda y Coloso.
Identificación de usuarios ancla	Asegurar demanda efectiva y viabilidad económica del proyecto.	Empresas mineras, industrias, municipios, operadores sanitarios.	Barrio Industrial La Negra, minería, riego urbano y áreas verdes pueden actuar como demandantes estratégicos.
Convenios o contratos de suministro	Definir caudales, calidad, precio, continuidad, responsabilidades y puntos de entrega.	Generador del efluente, operador sanitario, usuario final, eventualmente SISS u otros organismos fiscalizadores.	Relevante para venta o entrega de AST a industrias, minería o municipios.
Ruta de permisos sectoriales	Identificar autorizaciones sanitarias, ambientales, marítimas, hídricas y municipales.	SISS, SEREMI de Salud, SMA/SEA, DGA, DIRECTEMAR, municipios.	Necesario para proyectos con nuevas PTAS, impulsiones, estanques, redes o uso en espacios públicos.
Trazabilidad de caudales y calidad	Registrar origen, volumen, tratamiento, parámetros de calidad, destino y uso final del agua reutilizada.	Operador, usuario final, SISS, autoridad sanitaria y ambiental.	Permite controlar entregas a La Negra, minería, áreas verdes o sistemas locales.
Estándares de calidad por uso	Definir calidad requerida según destino del efluente tratado.	SISS, MINSAL/SEREMI de Salud, MMA, usuarios, operadores.	Diferencia exigencias para riego, uso industrial, minería, reúso ambiental o uso urbano no potable.
Modelo de financiamiento	Distribuir costos de inversión, operación, tratamiento adicional y monitoreo.	Usuario beneficiario, empresa sanitaria, Estado, GORE, privados.	Evita trasladar costos de reúso industrial/minero a usuarios residenciales.
Plan de operación y mantenimiento	Asignar responsabilidades sobre tratamiento, lodos, olores, monitoreo, estanques, redes y contingencias.	Operador sanitario, usuario final, fiscalizadores.	Crítico para sistemas descentralizados, PTAS menores y proyectos de riego urbano.
Participación y comunicación	Informar beneficios, riesgos controlados y medidas sanitarias para mejorar aceptación social.	Municipios, comunidades, usuarios, operadores, autoridades.	Especialmente relevante para áreas verdes, espacios públicos y proyectos visibles para la comunidad.
Seguimiento interinstitucional	Evaluar desempeño, cumplimiento, problemas operacionales y ajustes al proyecto.	Mesa técnica, SISS, SEREMI de Salud, MMA, DGA, DIRECTEMAR, usuarios.	Permite pasar de pilotos o experiencias puntuales a una estrategia regional de reúso.

Fuente: *elaboración propia.*

El respaldo documental plantea que las iniciativas deben analizare con enfoque de eficiencia hídrica a nivel de cuenca, considerando efectos sobre usuarios,

necesidades ambientales y no solo impactos locales; además se propone identificar desafíos y brechas para fomentar estas iniciativas. Se recomienda evaluar la creación o redefinición y estructurar modelos de financiamiento público, privado o mixto. El estudio GHD/ECONSSA para Antofagasta considera explícitamente la identificación de usuarios y compradores potenciales, modelos de negocio, alternativas centralizadas y descentralizadas, riego de áreas públicas, agricultura y minería. Por otro lado, ACADES refuerza que el impulso del reúso requiere identificar demanda, definir estándares técnicos, integrar el agua en la gestión de cuencas, desarrollar modelos de negocio sostenibles y otorgar certeza jurídica y económica.

Los antecedentes revisados muestran que no basta con contar plantas de tratamiento o volúmenes disponibles de AST, sino que es necesario establecer mecanismos claros de gobernanza entre actores públicos, privados y comunitarios involucrados. En este sentido, la identificación de usuarios ancla, la definición de contratos de suministro, la trazabilidad de caudales y calidad, la coordinación de permisos y asignación de responsabilidades operacionales constituyen condiciones fundamentales para transformar experiencias puntuales de reúso en una estrategia regional sostenible, orientada a la seguridad hídrica, la economía circular y el uso eficiente del recurso en un territorio marcado por la escasez hídrica estructural.

- **Agua tratada versus agua regenerada.**

La diferencia entre el agua tratada y agua regenerada es uno de los conceptos más relevantes. El agua servida tratada corresponde al efluente que ha sido sometido a procesos de tratamiento para cumplir una norma de emisión o descarga (D.S. N°90/00). En cambio, el agua regenerada corresponde a un efluente que además de haber sido tratado, cumple condiciones específicas de calidad para ser reutilizado en un uso determinado.

Para una propuesta técnico-regulatoria el cumplimiento de una norma de descarga no garantiza, por sí solo, que el efluente sea apto para reúso. La experiencia internacional, particularmente de España y el estado de California (USA), han logrado viabilizar esta práctica mediante políticas de estado activas e integrales, distinguiendo entre aguas tratadas que cumplen normas de vertido y aguas regeneradas aptas para usos específicos, junto con niveles de tratamiento según el uso previsto y proyectos evaluados bajo un enfoque de control de riesgos. Por lo tanto, se ha pasado de un paradigma de **“tratamiento y eliminación”** a uno de **“reutilización y recuperación del recurso”**.

España es el país europeo con mayor nivel de reutilización en volumen, el uso principal se lo lleva la agricultura con el 71% del agua regenerada, seguida por usos ambientales (17,7%) y recreativos (7,1%). Debido a que el costo de regeneración suele ser más alto para los agricultores, el Estado o las comunidades autónomas

suelen financiar la inversión inicial, mientras que los usuarios cubren la operación. Finalmente se prohíbe expresamente el reúso para consumo humano, salvo en situaciones de emergencia declarada.

Por otro lado, California destaca por su liderazgo técnico y normativo, impulsado por sequías recurrentes. Además del riego de jardines y uso industrial, ha avanzado significativamente en el reúso indirecto (IPR) (recarga de acuíferos) y está probando el reúso potable directo (DPR). En ciertas condiciones, el Estado puede obligar a particulares y empresas a reemplazar el consumo de agua potable por agua tratada su esta última está disponible para el uso requerido. Para fomentar la aceptación pública, han desarrollado estrategias comunicacionales específicas para que la población acepte el agua reciclada, incluso para fines potables.

Por otro lado, la calidad del efluente es una condición esencial para determinar la viabilidad del reúso. Esta calidad se expresa mediante parámetros físicos, químicos y microbiológicos, tales como DBO5, sólidos suspendidos totales, turbiedad¸ pH, aceites y grasas, nutrientes, coliformes fecales, cloro residual, salinidad, boro, cloruros, sulfatos y otros componentes que pueden afectar la salud, el ambiente o la operación de los usos finales. Muchas veces esto queda condicionado por la calidad del efluente, por los requerimientos de calidad de los potenciales usos y por la seguridad del efluente en cantidad y calidad. Asimismo, plantea que los parámetros controlados por las normas de vertido no son necesariamente los mismo que exigen los distintos aprovechamientos, por lo que requiere una evaluación caso a caso. Desde esta perspectiva, se adopta el enfoque **“apto para el propósito”,** es decir, la calidad del agua reutilizada debe definirse en función del uso final previsto. No es equivalente reutilizar agua para procesos mineros, riego de áreas verdes, riego agrícola, uso ornamental, recarga de acuíferos o uso urbano no potable. Cada uso implica distintos niveles de exposición, riesgos y exigencias de tratamiento.

En este contexto, las normas de emisión vigentes se utilizan como referencia para verificar las condiciones de descarga, pero su cumplimiento no acredita por sí solo la aptitud del efluente para reúso. Las tablas correspondientes al D.S. N.º 90/2000 y D.S. N.º 46/2002, con los límites máximos permisibles según tipo de cuerpo receptor, se presentan en el Anexo C. Estos antecedentes son utilizados posteriormente para identificar diferencias entre el cumplimiento de descarga y los requerimientos asociados al uso final.

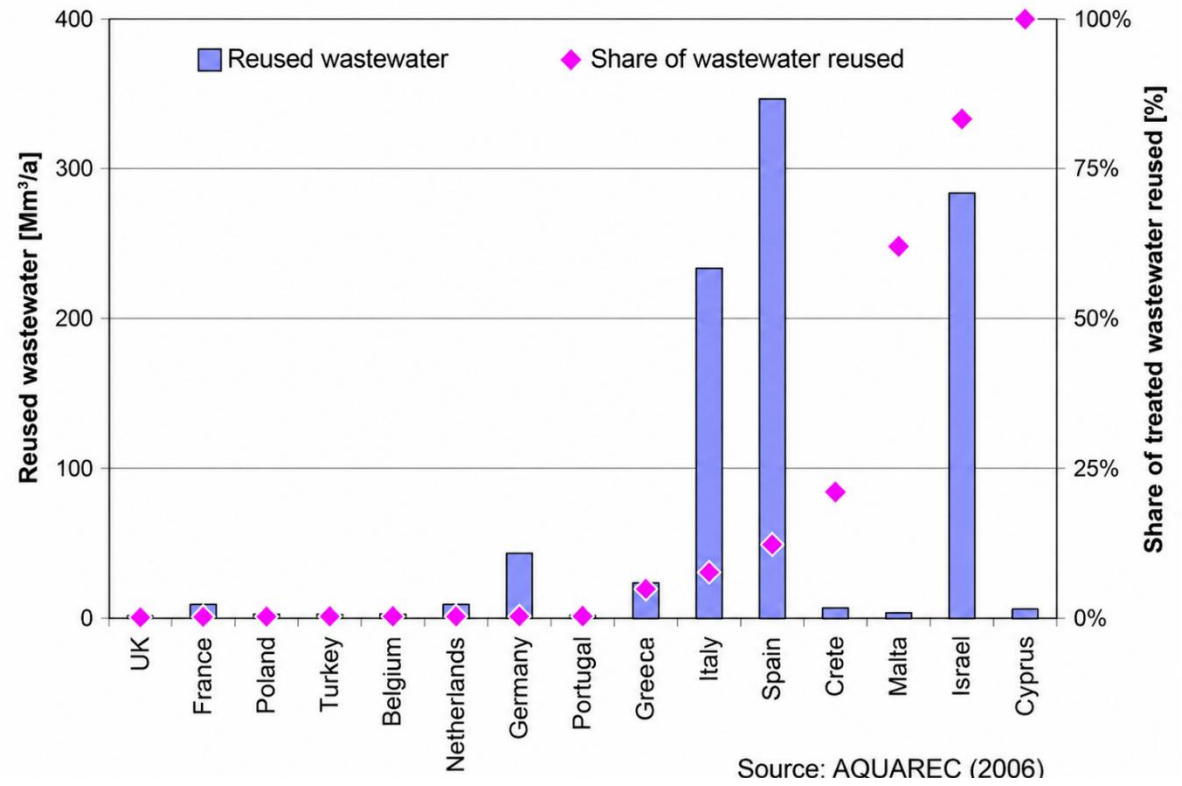
En consecuencia, el enfoque “apto para el propósito”, según el cual la calidad requerida del agua regenerada debe definirse en función del uso final. No es equivalente reutilizar AST para riego agrícola, riego de áreas verdes, procesos industriales, minería, recarga de acuíferos, uso recreativo o reúso interno de una planta de tratamiento. La regulación de Aguas Grises en Chile (Ley 21.075) representa una referencia útil, porque define usos autorizados, usos prohibidos, requisitos de calidad y exigencias de autocontrol. Aunque esta regulación no aplica

directamente a las AST urbanas tratadas, permite observar cómo podría estructurarse un enfoque regulatorio basado en tipos de uso y control sanitario.

La Figura 5 compara el volumen de aguas residuales reutilizadas y la proporción de reúso en distintos países, evidenciando diferencias relevantes en el nivel de aprovechamiento del recurso. Estos valores se contrastan con ciertas características que estos países comparten en sus modelos y que se indican a continuación:

- **Marcos Legales Específicos:** Distinguen claramente entre aguas tratadas (aptas para vertido) y aguas regeneradas (con tratamiento adicional para nuevos usos.
- **Definición de Propiedad:** Establecen con precisión quien es el dueño del agua para fines de reciclaje, utilizando generalmente la figura de concesiones de agua para reúso.
- **Calidad según Uso ("Fit for purpose"):** Las exigencias de tratamiento varían según el destino final (agrícola, urbano, industrial), aplicando un enfoque de control de riesgos con múltiples barreras de seguridad.
- **Gestión por Cuencas:** El reúso no es una iniciativa asilada, sino que responde a planes integrales de gestión de cuencas hídricas.

Figura 5. Volumen de aguas residuales reutilizadas y porcentaje de reúso en países seleccionados.



Fuente: Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater. AQUAREC. (2006).

La experiencia internacional enseña que para que el reúso sea viable en Chile, es indispensable una ley especial que otorgue seguridad jurídica sobre la propiedad del agua. Además, se destaca la importancia de la evaluación social de los proyectos, ya que los beneficios ambientales y de seguridad hídrica (externalidades positivas) a menudo justifican el apoyo financiero estatal que la rentabilidad privada no logra por si sola.

4.1.2 Resultados del panel de expertos

El panel de expertos se incorporó como una fuente cualitativa complementaria destinada a contrastar los antecedentes documentales con la experiencia técnica, regulatoria y operacional de especialistas vinculados al sector sanitario y al reúso de aguas servidas tratadas. Su análisis permitió incorporar juicio experto a la investigación y reconocer materias de convergencia y discrepancia relevantes para la posterior construcción de la pauta técnico-regulatoria y de fiscalización.

La consulta fue procesada mediante un enfoque Delphi modificado, adaptado al carácter abierto y cualitativo del instrumento utilizado. La aplicación se desarrolló a partir de una primera ronda de consulta individual a especialistas, cuyas respuestas fueron revisadas de forma comparativa y posteriormente codificadas para identificar ideas recurrentes, diferencias de criterio y materias que requerían mayor definición. A diferencia de un Delphi convencional, en esta etapa no se buscó alcanzar el consenso estadístico, sino estructurar el juicio experto y reconocer patrones de convergencia útiles para la investigación.

El procedimiento comprendió cuatro etapas: revisión individual de las respuestas; agrupación de los contenidos por dimensión temática; comparación del grado de coincidencia entre participantes; y síntesis de la convergencias y divergencias identificadas. Esta sistematización permitió transformar respuestas abiertas en antecedentes comparables, manteniendo al mismo tiempo los matices y posiciones particulares expresados por cada especialista. El enfoque se fundamenta en los principios del método Delphi de consulta sucesiva, retroalimentación controlada y revisión de las respuestas (Dalkey y Helmer, 1963; Linstone y Turoff, 1975). Dado que la investigación dispuso de una primera ronda estructurada, sus resultados corresponden a convergencias temáticas preliminares y no a un consenso Delphi definitivo.

El cuerpo analítico quedó constituido por tres respuestas únicas (n = 3). Para resguardar la preferencia expresada por cada participante (Tabla 5), se mantuvieron nominativos los antecedentes autorizados y se codificó como E2 al integrante que solicitó participación anónima.

La composición del panel y la experiencia asociada a cada participante se presentan en la Tabla 7.

Las respuestas se codificaron en cinco dimensiones: (i) gobernanza y marco institucional; (ii) planificación y gestión hídrica; (iii) aspectos económicos; (iv) aceptación social; y (v) visión futura. Se utilizó una escala de convergencia temática: alta cuando el tema aparece respaldado por tres especialistas (3/3); media cuando es respaldado por dos (2/3); e insuficiente cuando aparece en una respuesta o no existe información comparable (0-1/3). Esta escala no representa una prueba estadística ni reemplaza la segunda ronda propia del Delphi.

Tabla 7. Composición del panel analizado

Código	Identificación	Sector	Rol	Especialidad y experiencia
E1	Christian Lillo	Público	Jefe del Área de Estudios y Normas, SISS	Sector sanitario; 30 años
E2	Participante anónimo	Público Privado	Especialista en operación de tratamiento de aguas servidas en Antofagasta	Tratamiento de AST; 10 años
E3	Jacobo Homsi A.	Privado Académico	Asesor y profesor	Ingeniería sanitaria; experiencia desde 1977

Fuente: Elaboración propia.

En términos de gobernanza e institucionalidad, existe coincidencia en que el marco actual no entrega una respuesta integral para escalar el reúso. Las principales diferencias se relacionan con la identificación de la brecha principal: incertidumbre jurídica, fragmentación institucional o necesidad de mayor inversión y planificación. En conjunto, las respuestas muestran que las experiencias actuales pueden desarrollarse de manera puntual, pero requieren mayor certeza, coordinación y capacidad de replicación.

Respecto de la planificación y gestión hídrica, se observa una alta convergencia en incorporar el reúso dentro de la planificación territorial y de largo plazo. Los especialistas coinciden en que los usos deben definirse según calidad del efluente, demanda y condiciones territoriales, priorizando principalmente usos no potables como minería, industria, riego urbano y cuando corresponda, agricultura.

En la dimensión económica, los especialistas reconocen que el reúso puede ser viable, pero condicionado a la existencia de demanda estable, capacidad de pago, costos de infraestructura y mecanismos de financiamiento. Los contratos de lago plazo con usuarios industriales aparecen como una alternativa relevante, mientras que los usos municipales o comunitarios podrían requerir apoyo público o esquemas de cofinanciamiento.

En cuanto a la aceptación social existe acuerdo respecto de la necesidad de incorporar a la comunidad en la definición de necesidades, localización, beneficios

y riesgos de los proyectos, manteniendo el diseño técnico bajo responsabilidad especializada. La información, educación y demostración de la calidad del agua reutilizada aparecen como elementos relevantes para fortalecer la aceptación.

Finalmente, la visión futura es favorable al crecimiento del reúso, especialmente en el norte del país. Las respuestas convergen en que su expansión dependerá de avances regulatorios, integración en la planificación hídrica y definición de mecanismos estables de implementación. La Tabla 8 sintetiza las principales convergencias y materias pendientes identificadas en la primera ronda.

Tabla 8. Matriz de convergencia Delphi/ Convergencias y materias pendientes identificadas en la primera ronda

Tema	Síntesis	Respaldo	Convergencia	Implicancia
Política pública y planificación	Incorporar las AST en la planificación hídrica y territorial.	3/3	Alta	Eje estructural del modelo de gestión.
Actualización y certeza regulatoria	Clarificar reglas, competencias, inversión y condiciones de uso de los efluentes.	3/3	Alta	Base de la pauta técnico-regulatoria.
Coordinación interinstitucional	Articular SISS, DGA, MINSAL, DOH, autoridades ambientales, gobiernos regionales, municipios y titulares.	3/3	Alta	Requiere instancia formal y trazabilidad de decisiones.
Viabilidad económica condicionada	Evaluar demanda, distancia, calidad, inversión, costos operacionales y capacidad de pago.	3/3	Alta	Aplicar evaluación caso a caso.
Usos territoriales no potables	Priorizar minería, industria, riego urbano y, cuando sea viable, agricultura.	3/3	Alta	Definir calidad y control según uso final.
Participación ciudadana	Incorporar a la comunidad en necesidades, localización, usos, beneficios y riesgos.	3/3	Alta	Separar participación decisional de diseño especializado.
Incentivos y financiamiento	Combinar demanda de largo plazo, apoyo estatal y alianzas público-privadas.	3/3	Alta general	Los mecanismos específicos requieren segunda ronda.
Comunicación y educación	Explicar seguridad, calidad, beneficios y control de externalidades.	2/3	Media	Definir estrategia pública y responsable institucional.
Barreras técnicas	La tecnología es disponible; las restricciones principales serían regulatorias y económicas.	2/3	Media	Validar costos, confiabilidad y capacidad de tratamiento por proyecto.
Obligatoriedad del reúso	Existe apoyo a formalizarlo, pero varía entre obligación general, obligación territorial o integración programática.	2/3	Media	Definir umbrales y excepciones en segunda ronda.

Tema	Síntesis	Respaldo	Convergencia	Implicancia
Reúso potable directo	No existe base suficiente para establecer acuerdo; se privilegian usos no potables.	1/3	Insuficiente	Mantener fuera de la propuesta inicial o someter a consulta específica.

Fuente: elaboración propia.

A partir de estas convergencias, se priorizan los principales temas derivados del panel y su aporte al desarrollo de la propuesta que se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Priorización derivada de la primera ronda

Prioridad	Acción	Respaldo	Escala
1	Definir una política y marco regulatorio específico para el reúso de AST.	Alta	Nacional
2	Constituir un mecanismo formal de coordinación y planificación regional.	Alta	Nacional/regional
3	Establecer estándares, monitoreo y fiscalización diferenciados por uso.	Alta	Sectorial/proyecto
4	Diseñar incentivos y modelos de financiamiento respaldados por demanda estable.	Alta	Nacional/regional/proyecto
5	Implementar participación temprana y una estrategia de comunicación de riesgos y beneficios.	Media-alta	Regional/local

Fuente: elaboración propia

Como continuidad metodológica, se propone una segunda ronda Delphi destinada a someter estas convergencias preliminares a una valoración estructurada. Esta etapa no fue ejecutada dentro del alcance de la investigación, por lo que se plantea como una instancia posterior de validación de criterios, prioridades y eventuales umbrales de aplicación.

En síntesis, el panel entrega una base cualitativa para estructurar la pauta técnico-regulatoria y de fiscalización, especialmente en materias de certeza normativa, coordinación institucional, demanda, financiamiento, participación y planificación hídrica.

4.1.3 Síntesis de la revisión

La revisión analizada muestra que el reúso de aguas servidas tratadas constituye una alternativa técnicamente viable para aumentar la disponibilidad hídrica, especialmente en territorios con escasez estructural como la Región de Antofagasta. La literatura coincide en que existen tecnologías capaces de producir efluentes aptos para distintos usos, siempre que la calidad, el nivel de tratamiento y las medidas de control se definan de acuerdo con el destino final. Sin embargo, la evidencia también indica que la disponibilidad tecnológica por sí sola no garantiza la implementación del reúso.

Un resultado relevante del análisis es que las mayores oportunidades de reúso se representan en aquellos sistemas donde el efluente actualmente se dispone al mar o se utiliza de manera limitada. En particular, los sistemas costeros asociados a emisarios submarinos presentan un potencial estratégico, ya que corresponden a caudales que, bajo el esquema actual, se descargan al océano luego de un pretratamiento físico. Sin embargo, este potencial no es directamente aprovechable, debido a que los emisarios están diseñados para disposición y dilución marina, no para producir agua apta para reúso. Por ello, cualquier recuperación de estos caudales requiere incorporar tratamiento secundario, terciario o desinfección avanzada, además de resolver aspectos de conducción, almacenamiento, demanda efectiva y financiamiento.

Las principales brechas identificadas se concentran en ámbitos normativo e institucional. En Chile persisten dificultades asociadas a la definición de responsabilidades, coordinación entre organismos, condiciones de autorización y criterios de calidad específicos para distintos usos. Esta fragmentación explica por qué muchas iniciativas deben desarrollarse caso a caso, dependiendo de contratos, autorizaciones especificas o interpretaciones administrativas en vez de avanzar hacia esquemas de reúso más sistemáticos y replicables.

Desde la perspectiva de gestión, el estado del arte muestra una evolución hacia enfoques integrados que combinan dimensiones técnicas, ambientales, económicas e institucionales. El reúso se vincula crecientemente con seguridad hídrica, economía circular, gestión de riesgos y adaptación al cambio climático. Asimismo, adquieren mayor relevancia los criterios de calidad “apta para el propósito”, la trazabilidad de recurso y la coordinación entre generadores, reguladores y usuarios.

Se identificaron distintas lecciones aprendidas derivadas del análisis de experiencias regionales y nacionales, destacando la necesidad de planificar desde el uso y definir responsabilidades claras que se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Lecciones aprendidas del análisis de experiencias de reúso de AST

N°	Lección aprendida	Implicancia para Antofagasta
1	El reúso debe planificarse desde el uso final.	Permite definir calidad, tratamiento, permisos y responsabilidades.
2	La existencia de agua tratada no asegura reúso.	Se requiere demanda, infraestructura, financiamiento y gestión.
3	Los emisarios submarinos son una oportunidad condicionada.	Deben incorporar tratamiento secundario o terciario para reúso.
4	Las PTAS con tratamiento secundario tienen mejor punto de partida.	Antofagasta, Calama, Baquedano y Sierra Gorda pueden priorizarse según uso.
5	Los sistemas menores permiten pilotos replicables.	Coloso, Baquedano y Sierra Gorda son útiles para reúso local controlado.
6	La calidad debe definirse según el tipo de uso.	No basta cumplir normas de descarga como el D.S. N°90/00.
7	La titularidad del efluente debe estar clara.	Es clave para contratos, venta, cesión o entrega a terceros.
8	La trazabilidad es indispensable.	Debe conocerse origen, volumen, calidad, destino y usuario del agua reutilizada.
9	La coordinación temprana reduce riesgos.	Evita retrasos por permisos, observaciones sectoriales o falta de competencias claras.
10	El financiamiento debe vincularse al beneficiario.	Usuarios industriales o mineros debieran asumir costos cuando sean los principales beneficiarios.
11	La aceptación social debe gestionarse.	Especialmente relevante en riego urbano, áreas verdes y usos con exposición pública.
12	El reúso debe integrarse a la seguridad hídrica regional.	Permite avanzar desde experiencias puntuales hacia una estrategia territorial.

Fuente: *elaboración propia.*

En consecuencia, el reúso de AST en Antofagasta es técnicamente posible y territorialmente pertinente, pero requiere de una pauta técnico-regulatoria que ordene las condiciones mínimas para su implementación, la que será propuesta en esta investigación.

4.2 SUJETO DE ESTUDIO

El sujeto de estudio corresponde al sistema regional de tratamiento, disposición y potencial reúso de aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta. Su delimitación comprende instalaciones sanitarias de distinta escala, condiciones operacionales, calidad y destino de los efluentes, marco normativo, actores institucionales, económico, ambiental, de gobernanza y de potenciales usuarios.

La delimitación del sujeto de estudio considera los sistemas urbanos asociados al tratamiento y disposición de aguas servidas de la Región de Antofagasta y las condiciones necesarias para su eventual reutilización (Tabla 11).

Tabla 11. Delimitación general del sujeto de estudio

Área de delimitación	Descripción	Antecedente	Alcance
Territorial	Región de Antofagasta, incluyendo localidades costeras e interiores con sistemas de tratamiento o disposición de aguas servidas.	**41.463.124 m³/año** de aguas servidas urbanas tratadas en Antofagasta, año 2019.	Permite estudiar el reúso en una región árida con alta demanda hídrica.
Sanitaria	Sistemas urbanos concesionados de agua potable, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas servidas.	**195.891 clientes** de Aguas Antofagasta en 2025.	Delimita el análisis al sistema sanitario urbano regulado.
Técnica	PTAS, emisarios submarinos, lodos activados, lombrifiltro, pretratamiento, desinfección, conducción y almacenamiento.	Presencia de PTAS de lodos activados, lombrifiltro y emisarios submarinos.	Permite comparar tecnologías y su aptitud para reúso.
Operacional	Caudales, volúmenes tratados, cargas contaminantes, destino del efluente y capacidad de tratamiento.	Desde **1,0 l/s** en PTAS Coloso hasta **1.070 l/s** de caudal máximo puntual de diseño en emisario Antofagasta.	Permite evaluar disponibilidad efectiva de efluentes.
Normativa	D.S. N°90/00, programas de monitoreo, normas de calidad, fiscalización y brechas regulatorias del reúso.	Tabla 5 D.S. N°90/00: **300 mg/l SST**, **150 mg/l aceites y grasas**, pH **5,5–9**.	Diferencia cumplimiento de descarga y calidad requerida para reúso.
Institucional	SISS, ECONSSA, Aguas Antofagasta, TRATACAL, DGA, DOH, MINSAL, MMA, DIRECTEMAR, GORE, municipios y usuarios potenciales.	ECONSSA opera el tratamiento de aguas servidas de la ciudad de Antofagasta.	Permite analizar gobernanza, competencias y coordinación.
Económica	Costos de tratamiento adicional, conducción, operación, financiamiento y modelos de negocio.	Cambio tecnológico desde emisario a lodos activados podría implicar alzas tarifarias de hasta **50%** en ciertos casos.	Permite evaluar barreras de inversión y financiamiento.
Ambiental	Reducción de descargas, protección de cuerpos receptores, economía circular y menor presión sobre fuentes continentales.	**27.974.957 m³/año** descargados al mar en Antofagasta en 2019.	Permite analizar el reúso como medida de eficiencia hídrica.
Gobernanza	Coordinación entre actores, definición de demanda, acuerdos de suministro, trazabilidad, fiscalización y aceptación social.	Submesa de Reúso plantea analizar proyectos considerando efectos en cuencas, usuarios y ambiente.	Permite tratar el reúso como problema de gestión integrada.

Fuente: elaboración propia con base en antecedentes SISS.

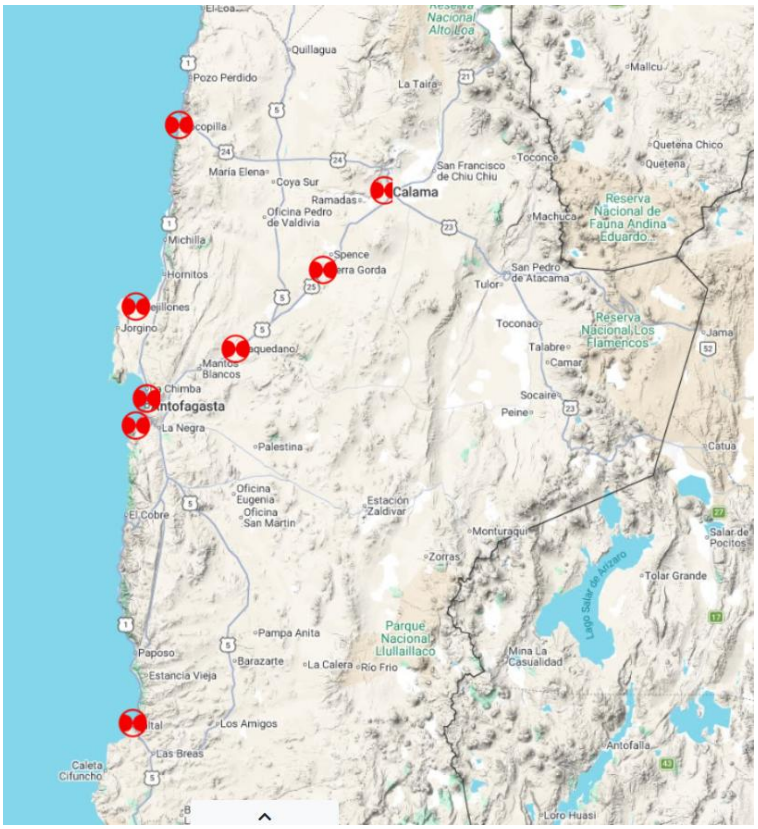
A continuación, la descripción de la delimitación del sujeto:

- **Delimitación territorial**

La delimitación territorial corresponde a la Región de Antofagasta e incorpora localidades costeras e interiores donde existen sistemas de tratamiento y disposición o reúso de aguas servidas tratadas. Se consideran principalmente Antofagasta, Calama, Mejillones, Tocopilla, Taltal, Baquedano, Sierra Gorda y San

Pedro de Coloso. Esta selección permite comparar ciudades costeras con disposición marina y localidades interiores con tratamiento biológico potencial de reúso local. La Figura 6 muestra bajo un símbolo de color rojo la localización de los principales sistemas de tratamiento.

Figura 6. Localización referencial de sistemas de tratamiento y disposición de aguas servidas en la Región de Antofagasta.



Fuente: elaboración propia a partir de la cartografía disponible en la NBI de la SISS, https://sit.siss.gob.cl/.

- **Delimitación sanitaria, técnica y operacional**

Esta delimitación se aborda de forma integrada. En lo particular desde el punto de vista sanitario, el estudio se circunscribe a sistemas urbanos concesionados y a las instalaciones asociadas al tratamiento, disposición y eventual reúso. La delimitación técnica distingue los sistemas de acuerdo con la tecnología de tratamiento y disposición (Tabla 12), haciendo hincapié que no todos los efluentes presentan la misma condición inicial para reúso. Finalmente, la delimitación operacional considera caudal, volumen tratado, capacidad de diseño, nivel de tratamiento y destino actual del efluente, antecedentes que permiten caracterizar la oferta disponible sin adelantar su clasificación de viabilidad identificando en la Tabla 13 los nueve sistemas sanitarios regionales considerados. En el Anexo B se indica el análisis integral de la situación del tratamiento en la Región de Antofagasta.

Tabla 12. Delimitación técnica por tipo de sistema

Tipo de sistema	Instalaciones consideradas	Características principales	Condición para reúso
Lodos activados	PTAS Antofagasta, Calama, Baquedano, Sierra Gorda	Tratamiento biológico secundario, sedimentación y desinfección.	Requiere control de calidad, continuidad operacional y definición de uso final.
Lombrifiltro	PTAS San Pedro de Coloso	Tratamiento biológico de menor escala mediante lecho filtrante orgánico.	Apto para reúso local controlado, principalmente riego.
Pretratamiento y emisario submarino	Antofagasta, Mejillones, Taltal, Tocopilla	Rejas, desarenado, desgrasado, cámara de carga y descarga marina fuera de ZPL.	Requiere tratamiento secundario/terciario y evaluación económica.
Sistemas de conducción y almacenamiento	Estanques, impulsiones, cámaras de carga y redes asociadas	Permiten transportar o regular el efluente tratado.	Requieren inversión, trazabilidad y puntos de entrega definidos.
Desinfección	Cloración, hipoclorito u otros sistemas según planta	Control microbiológico del efluente.	Clave para riego, usos urbanos no potables y reducción de riesgo sanitario.

Fuente: *elaboración propia.*

Tabla 13. Datos operacionales de sistemas regionales considerados

Sistema	Tipo de tratamiento / disposición	Dato duro principal	Destino actual / potencial
PTAS Antofagasta — Lodos Activados	Tratamiento secundario	**95 l/s** caudal medio actual; **120 l/s** diseño; **9.504 m³/d** caudal máximo día	Reúso productivo asociado a uso industrial/minero.
Emisario Submarino Antofagasta	Pretratamiento y descarga marina	**1.070 l/s** caudal máximo puntual de diseño; **92.488 m³/d** caudal máximo día	Potencial condicionado a tratamiento adicional.
PTAS Calama	Lodos activados	**266 l/s** caudal medio; **689.472 m³/mes** tratados	Potencial uso productivo, sujeto a evaluación técnica y normativa.
PTAS Baquedano	Lodos activados	**3,88 l/s** caudal medio; **10.057 m³/mes** tratados	Riego de áreas verdes o uso local.
PTAS Sierra Gorda	Lodos activados	**5,3 l/s** caudal medio; **13.738 m³/mes** tratados	Riego local y eventual uso productivo.
PTAS San Pedro de Coloso	Lombrifiltro	**1,0 l/s** caudal medio; estanque **50 m³**	Riego de áreas verdes.
Emisario Mejillones	Pretratamiento y descarga marina	**18 l/s** caudal medio actual; **26,6 l/s** diseño	Reúso condicionado a tratamiento secundario/terciario.
Emisario Taltal	Pretratamiento y descarga marina	**20 l/s** caudal medio actual; **22,3 l/s** diseño	Potencial condicionado a demanda e infraestructura.
Emisario Tocopilla	Pretratamiento y descarga marina	**38,35 l/s** caudal medio actual; **62 l/s** diseño	Potencial condicionado a tratamiento complementario.

Fuente: elaboración propia.

- **Delimitación Normativa**

La delimitación normativa considera el marco vigente aplicable al tratamiento y disposición de aguas servidas, especialmente el D.S. N°90/00 y los programas de monitoreo asociados. La Tabla 14 permite evidenciar de manera sintética, la diferencia entre los parámetros exigidos para la disposición marina y las exigencias adicionales que pueden requerirse para reúso.

Tabla 14. Delimitación normativa aplicable a emisarios submarinos

Parámetro	Unidad	Límite Tabla 5 D.S. N°90/00	Relevancia para reúso
Sólidos suspendidos totales	mg/l	**300**	Control básico de sólidos; insuficiente por sí solo para reúso.
Sólidos sedimentables	ml/l/h	**20**	Evalúa presencia de sólidos sedimentables.
Aceites y grasas	mg/l	**150**	Controla contaminantes relevantes para operación y ambiente.
Hidrocarburos totales	mg/l	**20**	Parámetro de control para descargas marinas.
Hidrocarburos volátiles	mg/l	**2**	Control de compuestos volátiles.
SAAM	mg/l	**15**	Indicador de detergentes y surfactantes.
pH	Unidad	**5,5–9**	Control básico fisicoquímico.
Coliformes fecales	NMP/100 ml	**No exigido**	Brecha crítica para reúso sanitario seguro.

Fuente: elaboración propia.

- **Delimitación institucional y de gobernanza**

La delimitación institucional incorpora a los actores que intervienen en la generación, tratamiento, disposición, autorización, fiscalización y financiamiento, bajo la mirada de viabilidad eventual del uso de las aguas servidas tratadas en un sistema o modelo que requerirá coordinación, definición de responsabilidades, permisos, condiciones de suministro, trazabilidad y mecanismos de control. Se consideran ajo la mirada actual a la SISS, Aguas Antofagasta, ECONSSA, TRATACAL, DGA, DOH, Autoridad Sanitaria, Ministerio de Medio Ambiente, DIRECTEMAR, Gobierno Regional, Municipalidades y potenciales usuarios productivos territoriales.

- **Delimitación Ambiental**

La delimitación ambiental se indica en la Tabla 15, la que considera el potencial del reúso para reducir la disposición de efluentes y valorizar una fuente hídrica ya generada como alternativa de aprovechamiento bajo condiciones técnicas, sanitarias y regulatorias verificables.

Tabla 15. Delimitación ambiental y potencial de reúso en Antofagasta en el 2019

Indicador	Datos	Lectura ambiental
AST tratadas en Antofagasta	**41.463.124 m³/año**	Volumen disponible para evaluar valorización.
AST descargadas al mar	**27.974.957 m³/año**	Principal oportunidad para reducir disposición marina.
AST descargadas a cauce superficial continental	**13.376.652 m³/año**	Recurso integrado a balances hídricos aguas abajo.
AST destinadas a riego	**111.515 m³/año**	Reúso directo regional aún marginal.
Caudal potencialmente reusable desde descarga marina	**0,93 m³/s**	Potencial estratégico para nuevas fuentes no convencionales.
Superficie regable estimada	**3.684 ha**	Permite dimensionar beneficio territorial potencial.

Fuente: elaboración propia adapto de informe MOP.

4.3 MARCO TEORICO DEL ESTADO DEL ARTE

El marco teórico del estado del arte se construye a partir de la revisión y sistematización de antecedentes técnicos, normativos e institucionales vinculados al reúso de aguas servidas tratadas, la gestión integrada de los recursos hídricos y la gobernanza del agua aplicados al sujeto de estudio. De esta manera se establecen las bases conceptuales de la investigación, articulando los principales enfoques desarrollados por la literatura nacional e internacional respecto a la escasez hídrica, la calidad del efluente, las tecnologías de tratamiento, la economía circular, la regulación sanitaria y la coordinación entre actores públicos y privados, todos ellos bajo un enfoque multidimensional, en el que convergen variables técnicas, normativas, institucionales y territoriales.

El marco teórico no solo describe el problema, sino que también establece las bases para la definición de criterios de evaluación, el desarrollo de la metodología y la formulación de una propuesta técnico-regulatoria, modelo real, considerando para ello un modelo teórico o conceptual. De esta forma se plantea un modelo teórico con base en el análisis reflejado en el mapa mental de la Figura 7. Este modelo se estructura sobre la base de tres dimensiones interrelacionadas **técnica, normativa e institucional o de gobernanza**, que se señalan a continuación. El detalle de los antecedentes organizados por dimensión se presenta en el Anexo A.

- **Dimensión Técnica:**

  Esta dimensión permite definir variables como disponibilidad de AST, caudales, remoción, tecnologías aplicables, almacenamiento, costos operacionales y posibilidades de uso final. Los antecedentes técnicos se concentran principalmente en documentos sobre calidad de efluentes, tecnologías de tratamiento, reúso agrícola, reúso productivo, tratamiento avanzado, humedales, zanjas ecológicas, sistemas modulares, monitoreo satelital, modelación hidrogeológica y resiliencia de infraestructura.

- **Dimensión Normativa:**

Esta dimensión permite identificar brechas como la ausencia de una norma integral de reúso de AST, indefinición sobre propiedad y disposición de las aguas tratadas, necesidad de estándares de calidad por uso, permisos, fiscalización, responsabilidades de usuarios y coordinación normativa entre organismos. Los antecedentes normativos se encuentran especialmente en los documentos sobre regulación del reúso en Chile, documentos SISS, guías internacionales de reúso, estudios sobre institucionalidad del agua, junto a la experiencia comparada con países como Perú, China y Estados Unidos.

- **Dimensión Institucional o de Gobernanza:**

Esta dimensión permite identificar actores relevantes, tales como la SISS, empresas sanitarias, DGA, DOH, GORE, municipios, usuarios productivos, comunidades y organismos ambientales. Además, permite analizar problemas de coordinación, fragmentación institucional de una gobernanza multinivel para viabilizar el reúso de aguas servidas tratadas en Antofagasta. Los antecedentes de gobernanza aparecen de manera transversal en documentos sobre cuencas, seguridad hídrica, análisis de actores, coordinación intersectorial, gobernanza inclusiva, contabilidad del agua, sistemas ciberfísicos, planificación estratégica y políticas públicas.

Otros análisis desarrollados permitieron identificar diversas ideas que fundamentan la pertinencia del reúso de AST como caso de estudio, sobre la base de la estructura señalada en el mapa conceptual de la Figura 8 y un desarrollo en extenso indicado en el Anexo A:

- La escasez Hídrica como condición estructural de referencia.
- El reúso de Aguas Servidas Tratadas (AST) como fuente alternativa y estratégica.
- La calidad del efluente es una condición habilitante para cualquier proyecto de reúso (Tabla 16).
- Existe una brecha regulatoria específica sobre el reúso de AST.
- La coordinación institucional es indispensable para implementar el reúso.
- La gobernanza del reúso debe incorporar actores, poder e inclusión efectiva.
- La información, trazabilidad y monitoreo son condiciones básicas para una buena gobernanza.
- El reúso debe evaluarse bajo un enfoque de riesgo y sostenibilidad.
- Las tecnologías deben seleccionarse según el uso final y el contexto territorial.
- El reúso se vincula con la economía circular y valorización de recursos.
- La aceptación social es una condición crítica para el éxito del reúso.

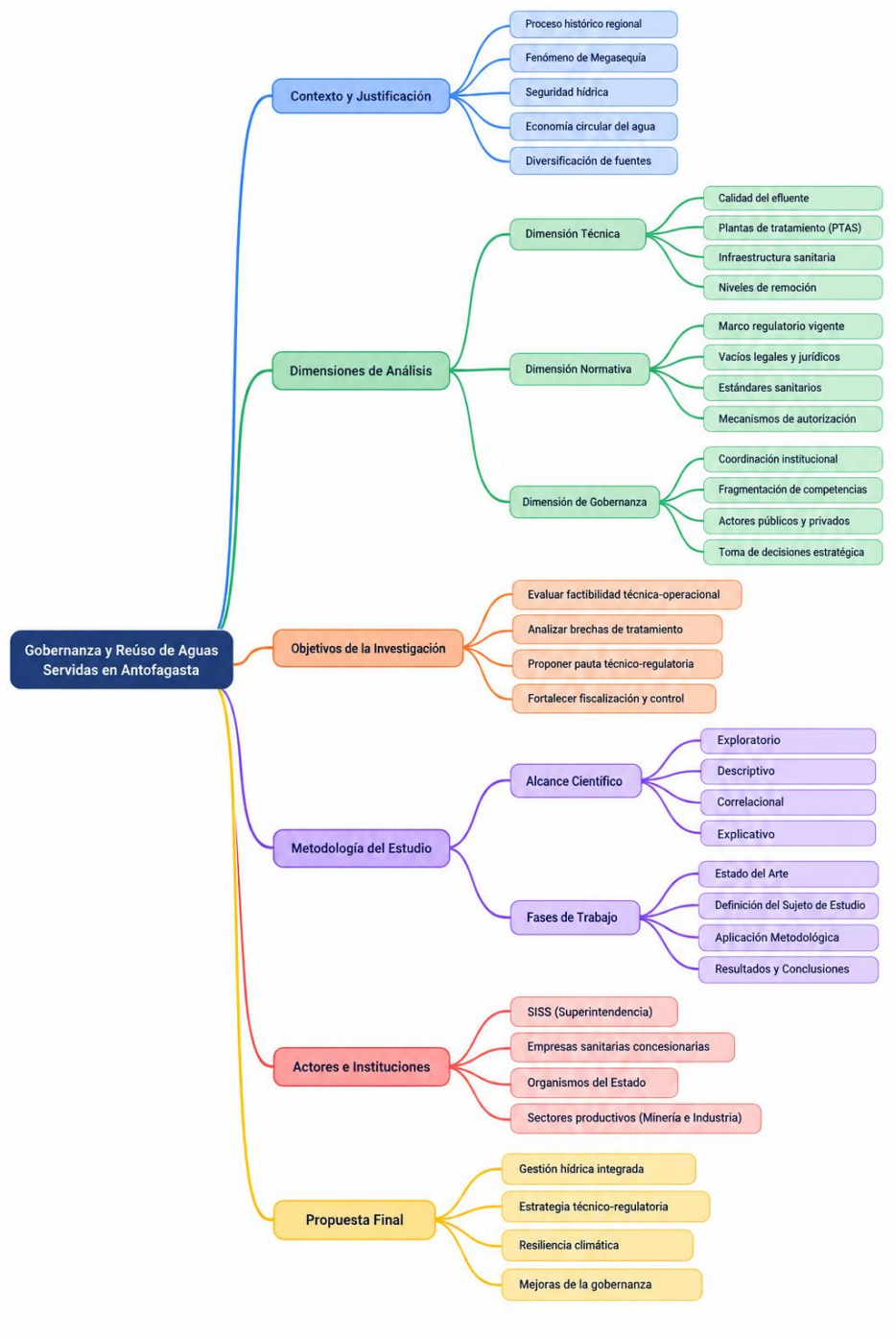
- La planificación hídrica debe incorporar escenarios futuros e incertidumbre climática.

Tabla 16. Resumen de calidades de efluente en PTAS monitoreadas en el país

Tipo de calidad del efluente	Parámetros observados	Resultados representativos del documento	Lectura para reúso
Calidad fisicoquímica básica	pH y temperatura	Se observan valores de pH cercanos a neutro, por ejemplo 7,22 en PTAS Río Bueno-La Unión y 7,29 en PTAS Valdivia.	En términos generales, el pH no aparece como la principal limitante para reúso, aunque debe evaluarse caso a caso.
Calidad microbiológica favorable	Coliformes fecales	Algunas PTAS presentan valores bajos o bajo límite de detección, por ejemplo, PTAS Trachisa y PTAS Placilla V con valores **<2 NMP/100 mL**.	Efluentes con baja carga microbiológica podrían tener mejor potencial para reúso, especialmente si mantienen desinfección estable.
Calidad microbiológica deficiente	Coliformes fecales	Se registran casos con valores muy elevados, como PTAS Río Bueno-La Unión con **3.000.000 NMP/100 mL** y PTAS Valdivia con **900.000 NMP/100 mL**.	Estos efluentes requerirían reforzar desinfección y control operacional antes de cualquier uso no potable.
Desinfección	Cloro libre residual	En varios casos el cloro residual aparece como **<0,1 mg/L** o cercano a cero, asociado a efluentes con alta presencia microbiológica.	La baja desinfección es una barrera relevante para reúso seguro, especialmente en usos agrícolas, urbanos o con contacto humano.
Carga orgánica	DBO5	Se observan resultados bajos en algunos casos, como PTAS Los Muermos con **DBO5 de 8 mg/L**, y valores más altos en otros, como Jardines de la Estación con **33 mg/L** o incluso **105 mg/L** en otro monitoreo.	La DBO5 permite distinguir efluentes con tratamiento más estable de aquellos que requieren mejoras de proceso antes del reúso.
Sólidos suspendidos	SST	Se observan valores bajos, como **8 mg/L** en PTAS Los Muermos, y valores más elevados, como **85 mg/L** en Jardines de la Estación.	Altos SST pueden afectar filtración, desinfección y operación de sistemas de riego o conducción.
Nutrientes	Fósforo y nitrógeno Kjeldahl	En PTAS Los Muermos se reportan valores como fósforo **2,3 mg/L** y nitrógeno Kjeldahl **2,9 mg/L**; en Jardines de la Estación se observan valores mayores, como nitrógeno Kjeldahl **20,3 mg/L**.	Los nutrientes pueden ser útiles para reúso agrícola, pero también representan riesgo de eutrofización si no se controlan.
Aceites, grasas y espumas	Aceites y grasas; poder espumógeno	En varios informes se reportan aceites y grasas bajo límite de detección, por ejemplo **<14 mg/L**, y poder espumógeno **<2 mm** en algunos casos.	Son parámetros complementarios para evaluar estabilidad del tratamiento y posibles restricciones operacionales.

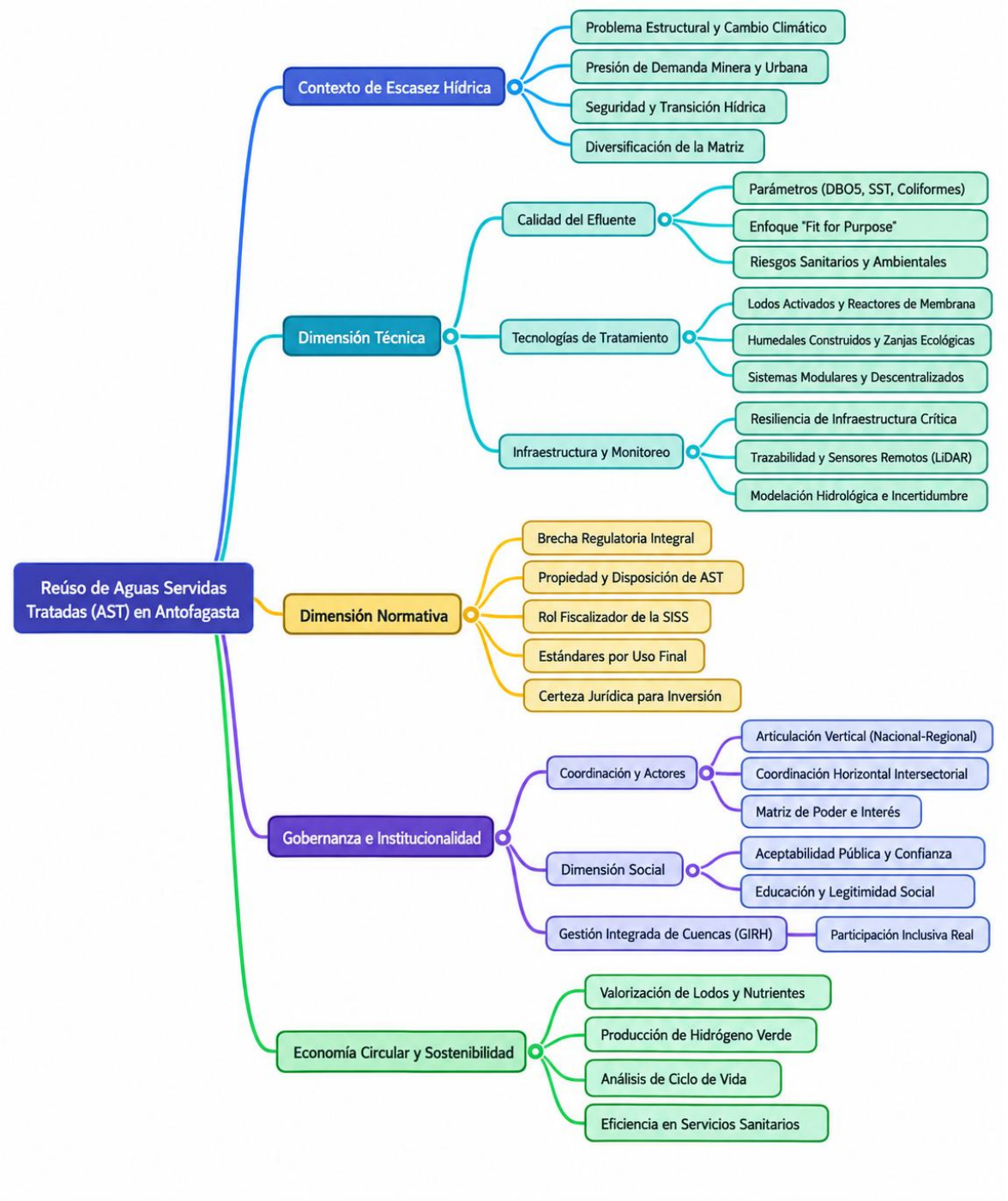
Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del documento ESTUDIO_212 calidad de efluentes SISS

Figura 7. Mapa mental del estudio



Fuente: elaboración propia mediante MindMeister.

Figura 8. Mapa conceptual de dimensiones y criterios de análisis para el reúso de AST.



Fuente: elaboración propia mediante MindMeister.

En la Figura 9 se señala la evolución del modelo teórico de la investigación, mostrando la transición desde los antecedentes conceptuales y el conocimiento del sujeto de estudio hacia la aplicación metodológica, las recomendaciones y la formulación final.

Figura 9. Evolución del modelo teórico



Fuente: *Elaboración propia a partir del marco conceptual y metodológico desarrollado en la investigación*

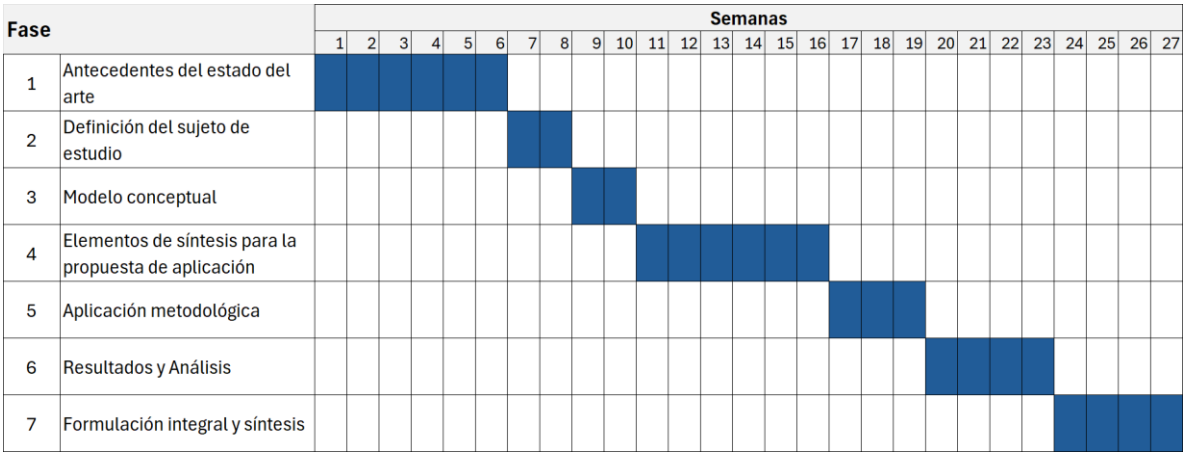
CAPITULO V

PROPUESTA METODOLOGICA

En este capítulo se define la propuesta metodológica que orienta el desarrollo de la investigación, estableciendo las etapas, criterios y herramientas necesarias para evaluar la viabilidad del reúso de aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta.

La metodología se estructura a partir de un enfoque integral que articula las dimensiones técnicas, normativa y de gobernanza del agua, permitiendo abordar el problema desde una perspectiva sistémica. Se plantea una secuencia de 7 fases que considera la revisión del estado del arte, la integración de conocimientos del programa de magíster, el levantamiento de información empírica y la aplicación de criterios de evaluación, con el propósito de identificar brechas y oportunidades para la implementación del reúso. De esta manera, la propuesta metodológica no solo guía el análisis del estudio, sino que también sustenta la formulación de una propuesta técnico-regulatoria orientada a fortalecer la gestión del recurso hídrico en un contexto creciente de escasez. La programación se indica en la Figura 10.

Figura 10. Carta Gantt de programación de las fases y actividades de la investigación



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, la descripción de las actividades de cada fase para el logro de sus respectivos objetivos específicos. Esta descripción se estructura en el nombre de la fase y las actividades pudiendo existir más de una actividad para cada fase.

- **Fase 1: Antecedentes del estado del arte (OE1 a OE3)**

  Se realizará una revisión estructurada de literatura científica, normativa, informes técnicos y antecedentes institucionales relacionados con el reúso de aguas servidas tratadas. La información será clasificada según dimensiones técnica, normativa institucional, identificando conceptos, tendencias, brechas y antecedentes relevantes para el estudio.

  En complemento, se analizarán los principales aportes de las asignaturas del programa, vinculándolos con las dimensiones técnicas, regulatorias, de gestión y gobernanza. La información será organizada mediante una matriz de integración que permita identificar su contribución a la investigación.

  Finalmente, se recopilarán antecedentes de experiencias de reúso desarrolladas o evaluadas en la Región de Antofagasta y otros contextos comparables, considerando tipo de uso, tratamiento, condiciones operacionales, barreras regulatorias, mecanismos de coordinación y principales lecciones aprendidas.

- **Fase 2: Definición del sujeto de estudio (OE4)**

  Se identifican los sistemas sanitarios, plantas de tratamiento, infraestructura, actores y condiciones territoriales e institucionales relevantes para el reúso de AST en Antofagasta. Esta actividad permitirá establecer el alcance del caso de estudio y sus principales componentes.

- **Fase 3: Modelo conceptual (OE5)**

  Se organizarán los conceptos fundamentales asociados al reúso de AST, gestión integrada de recursos hídricos, seguridad hídrica, economía circular, regulación y gobernanza. Estos antecedentes permitirán sustentar conceptualmente los criterios utilizados en la evaluación.

- **Fase 4: Elementos de síntesis para la propuesta de aplicación (OE6 a 10)**

  Se sintetizará la información proveniente de fuentes primarias y secundarias, incluyendo normativa vigente, informes técnicos, documentos institucionales, estudios académicos y antecedentes operacionales del sistema sanitario. Posteriormente la información será organizada matrices según las dimensiones técnica, normativa y de gobernanza, permitiendo estructurar una base sólida para el análisis del caso de estudio.

  Se definirán criterios de evaluación basados en la revisión del estado del arte y el marco teórico, considerando variables como la calidad del efluente, infraestructura disponible, cumplimiento normativo y nivel de coordinación institucional. Estos criterios permitirían evaluar de manera estructurada la viabilidad del reúso.

Se analizará el estado actual de las plantas de tratamiento de aguas servidas, identificando fuentes de generación, volúmenes tratados, niveles de tratamiento y disposición final. Este análisis permitirá evaluar el potencial de reúso desde una perspectiva técnica y operativa.

Se realizará un análisis del marco regulatorio vigente y de la estructura institucional, con el fin de identificar vacíos legales, limitaciones normativas y problemas de coordinación entre actores. Este análisis permitirá reconocer las principales barreras para la implementación del reúso.

Se definirán los pasos necesarios para el desarrollo de la investigación, estableciendo su secuencia lógica, prioridades y tiempos de ejecución. Esto se representará mediante una carta Gantt, que permitirá visualizar la planificación completa del estudio hasta su finalización.

- **Fase 5: Aplicación metodológica (OE10)**

  En esta etapa se aplicará el modelo de evaluación definido, utilizando los criterios técnicos, normativos y de gobernanza establecidos en la fase metodológica. La aplicación del modelo se realizará sobre el caso de estudio correspondiente a Antofagasta, considerando información del sistema sanitario, calidad de efluentes, infraestructura disponible y contexto institucional. El análisis se desarrollará mediante la evaluación de cada criterio definido, permitiendo determinar el nivel de cumplimiento del sistema respecto a las condiciones necesarias para implementar el reúso. Esta evaluación podrá representarse a través de matrices, escala o valoración de análisis cualitativo estructurado. Asimismo, se integrarán distintas dimensiones del estudio, permitiendo obtener una visión global de la viabilidad del reúso, identificando fortalezas y debilidades del sistema analizado.

- **Fase 6: Resultados y análisis (OE11)**

  A partir de los resultados obtenidos en la aplicación del modelo, se realizará un análisis interpretativo, orientado a identificar las principales brechas, oportunidades y factores críticos que inciden en la viabilidad del reúso de aguas servidas tratadas. Este análisis permitirá distinguir entre limitaciones de carácter técnico, normativo e institucional, facilitando la comprensión de las barreras que dificultan su implementación. Asimismo, se identificarán buenas prácticas y condiciones favorables que puedan ser replicadas o fortalecidas. En base a lo anterior, se elaborarán lineamientos de mejora, enfocados en optimizar la implementación del reúso desde una perspectiva técnica y de gobernanza. Estos lineamientos constituirán la base para la posterior formulación de una propuesta técnico-regulatoria.

Los resultados parciales serán sistematizados para determinar relaciones entre las dimensiones analizadas y establecer las condiciones que influyen en la viabilidad del reúso.

- **Fase 7: Formulación integral y síntesis (OE12 a OE14)**

  En esta etapa se elaborará una propuesta basada en los resultados y conclusiones del estudio, orientada a mejorar las condiciones para la implementación del reúso de aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta. La propuesta deberá considerar aspectos relacionados con:

  - Mejoras en el marco normativo
  - Fortalecimiento de la gobernanza del agua
  - Lineamientos técnicos para reúso
  - Mecanismos de coordinación institucional

  Se integrarán los principales hallazgos de la investigación, relacionándolos con los objetivos específicos y con las condiciones técnicas, regulatorias, ambientales y de gobernanza identificadas. Finalmente, se generarán recomendaciones enfocadas en superar las brechas identificadas, proponiendo soluciones concretas y aplicables al contexto regional, con énfasis en la sostenibilidad y la seguridad hídrica. De esta forma, la propuesta buscará aportar a la toma de decisiones en el ámbito público y sanitario, posicionando el reúso como una alternativa viable dentro de la gestión del recurso hídrico.

CAPITULO VI

APLICACIÓN METODOLOGICA

Este capítulo comprende elementos de síntesis de la sistematización de antecedentes (criterios técnicos, regulatorios, institucionales y de fiscalización), junto a otros elementos conceptuales para el desarrollo preliminar de la pauta propuesta técnico-regulatoria y de fiscalización.

6.1 ANTECEDENTES Y ELEMENTOS CONCEPTUALES PARA LA APLICACIÓN.

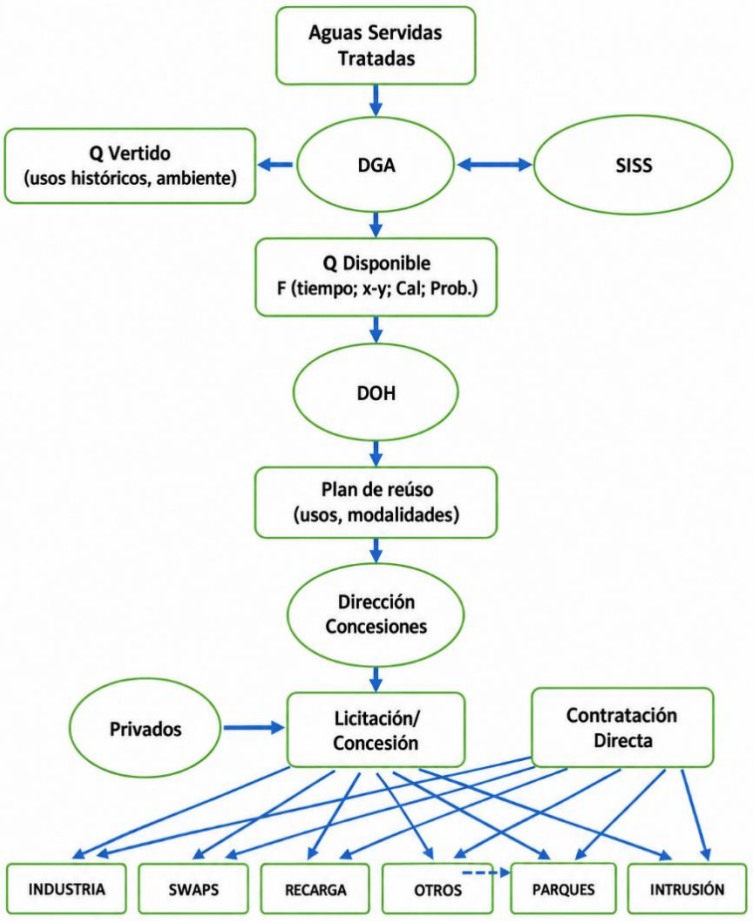
Se complementan los conceptos de gobernanza, de fiscalización y trazabilidad y del modelo conceptual para el reúso de aguas servidas tratadas (AST).

- **Gobernanza del reúso de AST.**

La gobernanza corresponde al conjunto de instituciones, normas, competencias, procedimientos y mecanismos de coordinación que permiten implementar proyectos de reutilización de manera segura y sostenible. Dado que el reúso involucra al sector sanitario, ambiental, hídrico, sanitario-salud, territorial y productivo, su desarrollo requiere una institucionalidad coordinada. El modelo debe plantear la necesidad de avanzar hacia una estructura institucional que defina el caudal de reúso, elabore planes de reutilización y establezca mecanismos de asignación o concesión. Además, se debe proponer asignar responsabilidades a organismos públicos para determinar caudales disponibles, planificar infraestructura y estructurar proyectos. Este enfoque debe ser adaptado incorporando el rol de la SISS en la fiscalización sanitaria sectorial, así como la participación de organismos con competencia en agua, salud, ambiente, borde costero, planificación territorial y usos finales.

En la Figura 11 se presenta un esquema general del procedimiento para proyectos de reúso, identificando la relación entre AST, la determinación de caudal disponible, la participación de organismos como la DGA, SISS y DOH y la posterior definición de un plan para reúso. Asimismo, muestra posibles modalidades de implementación, tales como licitación, concesión o contratación directa, orientadas a distintos usos finales como industria, recarga, parques, sistemas de agua potable rural u otros destinos. En complemento, en la Figura 12 organiza los principales actores del reúso en cuatro pilares estratégicos, permitiendo visualizar sus roles y la necesidad de coordinación entre fiscalización, infraestructura, operación y demanda territorial.

Figura 11. Esquema general del procedimiento para proyectos de reúso de AST.



Fuente: elaboración propia.

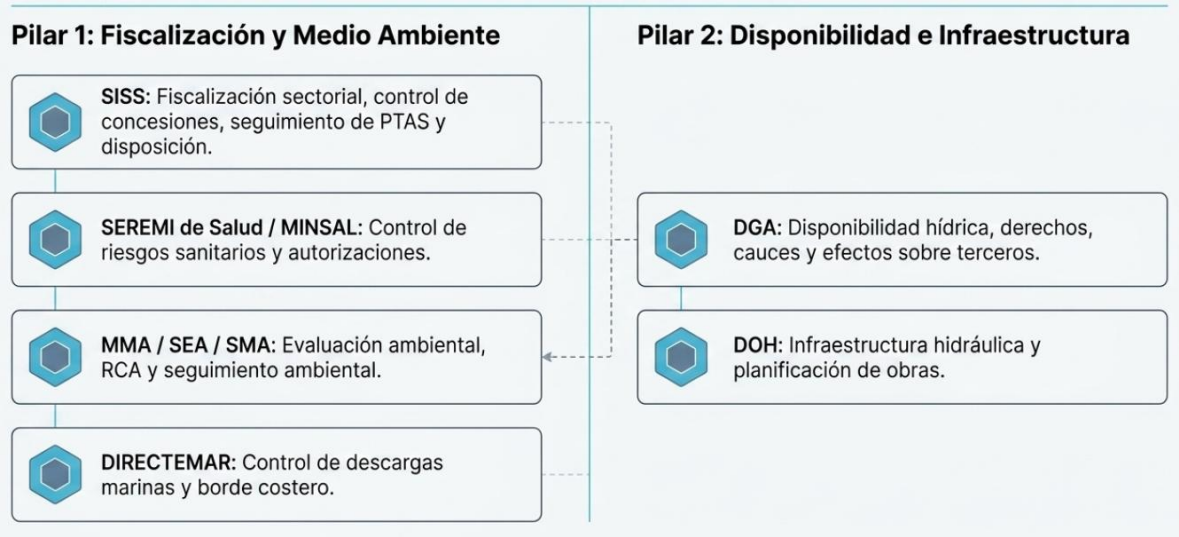
Figura 12. Mapa de actores relevantes organizados en 4 pilares estratégicos.



Fuente: elaboración propia.

Las Figura 13 y 14 representan de manera complementaria, la estructura institucional y territorial asociada al reúso, identificando por una parte a los organismos con competencias de regulación, fiscalización, disponibilidad hídrica e infraestructura, y por otra los actores vinculados con la operación, financiamiento, demanda y legitimidad territorial. En conjunto, ambas figuras permiten visualizar la necesidad de coordinación entre instituciones públicas, operadores y usuarios para habilitar y sostener los proyectos.

Figura 13. Marco regulatorio institucional para la gobernanza del reúso de aguas servidas tratadas



Fuente: elaboración propia

Figura 14. Operación, demanda y legitimidad territorial en proyectos de reúso de aguas servidas tratadas



Fuente: elaboración propia

La coordinación resulta fundamental dado que cada actor controla una parte distinta del sistema. La falta de articulación puede generar duplicidad de exigencias, vacíos de responsabilidad, conflictos de competencia o incertidumbre para los proyectos. Por ello, el marco conceptual propone entender la gobernanza como una condición habilitante para el reúso, al mismo nivel que la calidad del efluente o la infraestructura.

- **Fiscalización y trazabilidad**

La fiscalización debe extenderse más allá del control de cumplimiento en el punto de descarga. En un sistema de reúso, el control debe abarcar el origen del efluente, el tratamiento aplicado, la calidad del agua, el volumen entregado, la conducción, el almacenamiento, el punto de entrega, el usuario receptor y el uso final autorizado. La SISS fiscaliza la calidad del servicio de tratamiento mediante autocontrol, controles directos y fiscalizaciones en terreno. Sin embargo, para fines de reúso, se requiere complementar este enfoque con instrumentos de trazabilidad que permitan verificar el recorrido completo del recurso utilizado.

La trazabilidad permite asegurar que el agua regenerada sea utilizada conforme al destino autorizado, manteniendo control sobre los parámetros críticos de calidad, los volúmenes entregados y la responsabilidad operacional ante incumplimientos. En la Tabla 17 se definen los componentes esenciales de trazabilidad y las preguntas críticas de fiscalización que permiten auditar el flujo del agua tratada desde su origen hasta el uso final.

Tabla 17. Componentes de trazabilidad y preguntas de fiscalización para proyectos de reúso de AST.

Componente de trazabilidad	Pregunta de fiscalización
Origen	¿Desde qué PTAS o sistema proviene el efluente?
Tratamiento	¿Qué nivel de tratamiento recibió?
Calidad	¿Qué parámetros cumple y con qué frecuencia se controla?
Volumen	¿Cuánto caudal se entrega y cómo se mide?
Punto de entrega	¿Dónde se transfiere al usuario?
Usuario receptor	¿Quién recibe el agua regenerada?
Uso autorizado	¿Para qué actividad se utiliza?
Responsable operacional	¿Quién opera e informa?
Reportabilidad	¿Qué antecedentes se entregan a la autoridad?
Contingencia	¿Qué medidas se aplican ante incumplimientos?

Fuente: *elaboración propia, en base al análisis de requerimientos de fiscalización, control operacional y trazabilidad aplicables al reúso de aguas servidas tratadas.*

Este enfoque permite sustentar que una propuesta técnico-regulatoria debe incorporar una pauta de fiscalización específica para reúso, distinta de la fiscalización tradicional de descarga

- **Modelo conceptual integrado**

El modelo conceptual de la investigación se estructura en ocho dimensiones interrelacionadas: contexto hídrico, fuente de AST, calidad y tratamiento, infraestructura, uso potencial, marco normativo, gobernanza, fiscalización y trazabilidad. Estas dimensiones permiten analizar el reúso como un sistema completo, donde la disponibilidad de caudal es solo una de las condiciones necesarias. Para que el reúso sea viable también requiere calidad compatible, infraestructura, definición de uso, certeza normativa, coordinación institucional, financiamiento y control posterior. La Figura 15 presenta la matriz diagnóstica utilizada para organizar las principales dimensiones del modelo, vinculando cada componente técnico-operativo e institucional con las preguntas críticas que orientan la evaluación del reúso.

Figura 15. Matriz diagnóstica de preguntas críticas para evaluar el modelo de reúso de aguas servidas tratadas

Capas Técnico-Operativas	**Contexto hídrico**	Escasez, aridez y demanda	¿Por qué es necesario reutilizar AST?
	Fuente de AST	PTAS, emisarios y disposición	¿Dónde se genera el recurso?
	Calidad y tratamiento	Parámetros y aptitud	¿El efluente puede reutilizarse?
	Infraestructura	Conducción y almacenamiento	¿Es posible transportar y controlar el agua?
Capas Institucionales	**Uso potencial**	Minería, industria, riego	¿Para qué puede utilizarse?
	Marco normativo	Descarga, permisos, titularidad	¿Qué habilita o restringe el reúso?
	Gobernanza	Actores, competencias, coordinación	¿Quién decide, opera, autoriza y financia?
	Fiscalización	Monitoreo, destino, contingencia	¿Cómo se asegura el reúso seguro?

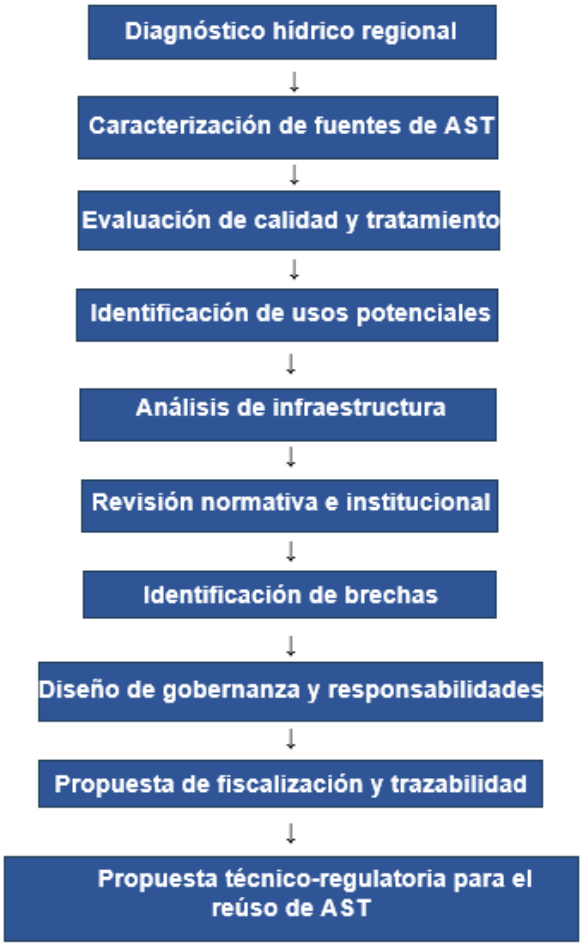
Fuente: elaboración propia, en base al marco conceptual propuesto para la evaluación técnico-operativa e institucional de proyectos de reúso de aguas servidas tratadas.

Cada dimensión se transforma en una variable de análisis y en un producto verificable dentro de la investigación. En primer lugar, el contexto hídrico permite fundamentar la necesidad del reúso como respuesta a la escasez hídrica de la región. Luego, la fuente de AST permite identificar las plantas y sistemas con potencial de reutilización. Posteriormente, la dimensión de calidad y tratamiento permite determinar si el efluente cumple condiciones mínimas o requiere tratamiento

adicional para ser considerada agua regenerada. Una vez identificada la oferta técnica, el modelo incorpora la dimensión de uso potencial, que permite vincular el recurso con demandas concretas. Esta vinculación debe ser evaluada junto con la infraestructura disponible o requerida, ya que la distancia entre fuente y usuario, la necesidad de impulsión, almacenamiento o conducción puede modificar la factibilidad del proyecto.

Posteriormente, el análisis se desplaza hacia las dimensiones normativa e institucional, donde se identifican las barreras regulatorias, los permisos, la titularidad del recurso y las competencias de cada organismo. Finalmente, el modelo incorpora la fiscalización y trazabilidad, asegurando que cualquier propuesta de reúso contemple mecanismos de control, medición, reportabilidad y contingencia. De esta forma, el modelo permite avanzar metodológicamente desde el diagnostico hacia la propuesta final (Figura 16).

Figura 16. Secuencia metodológica para la formulación de la propuesta técnico-regulatoria y de fiscalización del reúso de AST.



Fuente: elaboración propia

En términos conceptuales, la viabilidad no depende de una sola variable sino de la convergencia de varios factores y puede expresarse de la siguiente manera:

Viabilidad del reúso de AST = f(Ch + FAST + Qt + I + U + N + G + Fz)

Donde:

Ch:	Contexto hídrico y necesidad territorial
FAST:	Fuente de aguas servidas tratadas
Qt:	Calidad del efluente y nivel de tratamiento
I:	Infraestructura disponible o requerida
U:	Uso potencial y demanda identificada
N:	Marco normativo y permisos
G:	Gobernanza y coordinación institucional
Fz:	Fiscalización, trazabilidad y contingencia

Bajo este enfoque un proyecto de reúso será viable cuando exista una fuente de AST continua, una calidad compatible con el uso previsto, infraestructura factible, usuario identificado, certeza normativa, responsabilidades institucionales claras y mecanismos de fiscalización que permitan controlar el recurso desde su origen hasta su destino final. El modelo integrado propuesto permite comprender el reúso de AST como un sistema completo, donde convergen aspectos hídricos, técnicos, normativos, institucionales, operacionales y de control. Su principal aporte es que transforma el marco conceptual en una estructura metodológica aplicable, permitiendo evaluar de manera ordenada la viabilidad del reúso en Antofagasta.

En este sentido, el modelo cumple una doble función. Primero, organiza los conceptos centrales de la investigación, diferenciando entre agua tratada, agua regenerada, calidad según uso, gobernanza, infraestructura y trazabilidad. Segundo, sirve como base para las actividades posteriores, ya que orienta la recopilación de antecedentes, la construcción de matrices de análisis, la identificación de brechas y la formulación de una propuesta técnico-regulatoria y de fiscalización. Por lo tanto, el modelo conceptual integrado constituye el eje articulador de la investigación, permitiendo pasar desde el diagnóstico de la escasez hídrica y la disponibilidad de AST hacia una propuesta concreta para promover el reúso seguro, regulado y fiscalizable.

6.2 CONSTRUCCIÓN DE LA PAUTA TÉCNICO- REGULATORIA Y DE FISCALIZACIÓN

La pauta se organiza en cinco dimensiones complementarias. Cada dimensión contiene criterios, indicadores y medios de verificación. La dimensión técnica determina si existe una fuente estable y un proceso de tratamiento adecuado; la sanitaria verifica la compatibilidad de la calidad con el uso final; la infraestructura evalúa la posibilidad de almacenar, conducir y entregar el recurso; la dimensión normativa y de gobernanza revisa permisos, responsabilidades y coordinación; y la trazabilidad examina la capacidad de medir, registrar y fiscalizar. En la Tabla 18 se articula la estructura de la pauta propuesta, organizando sus dimensiones, criterios, indicadores y medios de verificación.

Tabla 18. Matriz de dimensiones, criterios e indicadores

Dimensión	Criterio	Indicador principal	Medio de verificación
Técnica-operacional	Disponibilidad del efluente	Caudal medido, estabilidad, estacionalidad	Registros de caudal, balances, memoria operacional
Técnica-operacional	Capacidad del tratamiento	Tipo de proceso, holgura, continuidad	Memorias, PDM, informes de operación
Sanitaria-ambiental	Calidad para el uso previsto	DBO5, SST, pH, coliformes, nutrientes, otros	Laboratorios, programas de monitoreo, RCA
Sanitaria-ambiental	Riesgo sanitario y ambiental	Exposición humana, contacto, impacto en suelo o receptor	Evaluación de riesgo, autorizaciones sanitarias
Infraestructura	Almacenamiento y regulación	Volumen útil, respaldo, control de rebalse	Planos, fichas técnicas, inspección
Infraestructura	Conducción y punto de entrega	Distancia, impulsión, redundancia, medición	Proyecto de ingeniería y presupuesto
Normativa-gobernanza	Habilitación jurídica	Destino concesional, permisos, titularidad	Decreto, RCA, autorizaciones, oficios
Normativa-gobernanza	Roles y coordinación	Liderazgo, operador, usuario, acuerdos	Convenios, contratos, matriz de actores
Fiscalización-trazabilidad	Medición y seguimiento	Caudal, calidad, destino, usuario, reportabilidad	Caudalímetros, registros, plataforma de reporte
Fiscalización-trazabilidad	Respuesta ante incumplimientos	Alarmas, suspensión, contingencias, responsabilidades	Procedimientos operacionales y fiscalización

Fuente: elaboración propia.

Para reducir la subjetividad, cada criterio se formula como una pregunta cerrada y se acompaña de una escala ordinal. La valoración 3 representa una condición acreditada; 2 indica una condición alcanzable mediante medidas específicas; 1 identifica una brecha relevante; y 0 corresponde a una condición ausente o sin antecedentes suficientes. Cuando la falta de información impida evaluar, debe registrarse expresamente y generarse un requerimiento de antecedentes. La Tabla

19 especifica las preguntas de evaluación y la escala ordinal de valoración (0 a 3) empleada para medir objetivamente el nivel de cumplimiento de cada criterio.

Tabla 19. Preguntas y escala de valoración

Pregunta de evaluación	Variable	Regla de valoración
¿Existe un caudal medido, estable y suficiente para el uso propuesto?	Caudal y volumen	3: acreditado / 2: parcial / 1: inestable / 0: sin dato
¿El tratamiento actual produce un efluente compatible o técnicamente acondicionable?	Nivel de tratamiento	3: compatible / 2: mejora acotada / 1: mejora mayor / 0: incompatible
¿La calidad está demostrada mediante series representativas?	Calidad	3: serie completa / 2: parcial / 1: antecedentes aislados / 0: sin datos
¿Existe infraestructura de almacenamiento, conducción y entrega?	Infraestructura	3: disponible / 2: obra menor / 1: obra mayor / 0: no definida
¿El uso final y el usuario se encuentran identificados?	Demanda	3: acuerdo formal / 2: interés verificable / 1: usuario hipotético / 0: no identificado
¿Existe una ruta de permisos y responsabilidades definida?	Habilitación	3: clara / 2: condicionada / 1: incertidumbre alta / 0: impedimento
¿Se dispone de medición, monitoreo y trazabilidad del destino?	Fiscalización	3: completo / 2: parcial / 1: débil / 0: inexistente

Fuente: elaboración propia.

La pauta se aplica a cada sistema por separado. El evaluador debe registrar el puntaje, la evidencia y una observación breve. Los criterios sanitarios, de habilitación jurídica y de trazabilidad se consideran críticos: una valoración igual a cero en alguno de ellos impide clasificar el sistema como favorable, aun cuando el puntaje total sea alto. En la Tabla 20 se consolida la pauta de evaluación, identificando los criterios cuyo cumplimiento se define como crítico y la evidencia mínima requerida para su validación.

Tabla 20. Pauta consolidada de evaluación

Dimensión	Criterio	Puntaje	Crítico	Evidencia mínima
Técnica-operacional	Disponibilidad de caudal	0-3	Sí	Registros y balance
Técnica-operacional	Capacidad y continuidad del tratamiento	0-3	Sí	Operación y diseño
Sanitaria-ambiental	Calidad para el uso final	0-3	Sí	Resultados de laboratorio
Infraestructura	Almacenamiento, conducción y entrega	0-3	No	Proyecto o instalaciones
Normativa-gobernanza	Permisos, titularidad y responsabilidades	0-3	Sí	Instrumentos jurídicos
Normativa-gobernanza	Usuario, financiamiento y coordinación	0-3	No	Convenios y acuerdos
Fiscalización-trazabilidad	Medición, reportabilidad y contingencias	0-3	Sí	Sistema de control

Fuente: elaboración propia.

6.3 ELEMENTOS BASE PARA UNA RUTA NORMATIVA E INSTITUCIONAL DEL REÚSO

Se identifica una ruta de implementación, diferenciando la obligación de tratamiento y disposición del servicio sanitario de las condiciones adicionales necesarias para un nuevo uso del efluente. Para ello se sintetizan los antecedentes de sistemas de tratamiento a nivel regional (Tabla 21), junto a su potencial de intervención para el reúso (Tabla 22), para finalmente establecer los elementos decisionales de la ruta en los aspectos normativos e institucionales (Tabla 23).

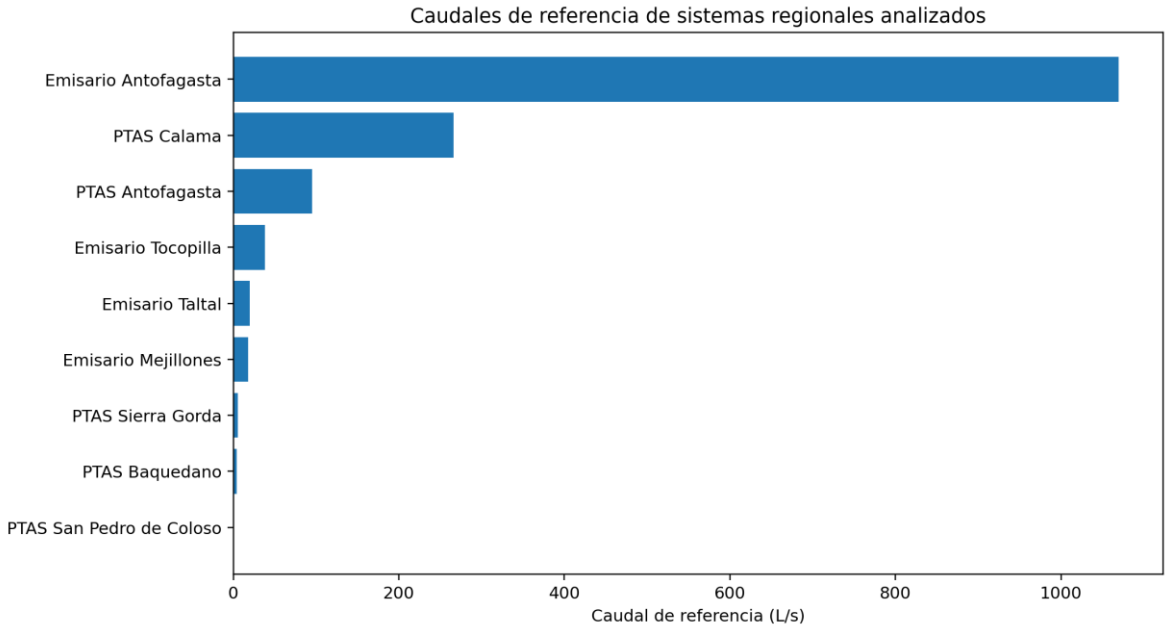
Tabla 21. Matriz consolidada de sistemas de tratamiento

Sistema	Tratamiento	Caudal ref. (L/s)	Destino actual	Potencial de reúso	Condición principal
PTAS Antofagasta	Lodos activados	95.00	Reúso productivo industrial/minero	Alto	Reúso existente; fortalecer control y trazabilidad
PTAS Calama	Lodos activados	266.00	Descarga continental / potencial productivo	Alto	Requiere definición de demanda, permisos e infraestructura
PTAS Baquedano	Lodos activados	3.88	Riego de áreas verdes / uso local	Medio	Escala local; requiere formalización y control
PTAS Sierra Gorda	Lodos activados	5.30	Riego local / eventual uso productivo	Medio	Holgura hidráulica, pero brechas de carga orgánica y lodos
PTAS San Pedro de Coloso	Lombrifiltro	1.00	Riego de áreas verdes	Medio	Reúso local existente; requiere seguimiento microbiológico
Emisario Antofagasta	Pretratamiento + emisario	1070.00	Descarga marina	Alto	Alto potencial volumétrico; requiere tratamiento secundario/terciario
Emisario Mejillones	Pretratamiento + emisario	18.00	Descarga marina	Condicionado	Requiere tratamiento adicional, demanda e infraestructura
Emisario Taltal	Pretratamiento + emisario	20.00	Descarga marina	Condicionado	Potencial condicionado a demanda y solución de tratamiento
Emisario Tocopilla	Pretratamiento + emisario	38.35	Descarga marina	Condicionado	Requiere tratamiento complementario y modelo de implementación

Fuente: elaboración propia.

Se observa que el mayor volumen potencial se concentra en el emisario de Antofagasta, sin embargo, este caudal no puede considerarse directamente reutilizable porque corresponde a un sistema de pretratamiento y disposición marina. En contraste, las PTAS con tratamiento biológico presentan menores volúmenes, pero una condición técnica más próxima al reúso. Esta diferencia demuestra que el caudal disponible debe analizarse juntamente con la calidad y nivel de tratamiento. La Figura 17 compara los caudales de referencia de los sistemas regionales analizados, permitiendo visualizar las diferencias de escala entre PTAS y emisarios y su relación con el potencial de reúso considerado en la evaluación técnico-operacional.

Figura 17. Caudales de referencia de los sistemas analizados



Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 35 la clasificación sintetizada, diferenciando entre sistemas con reúso existente o consolidable, sistemas con potencial cercano sujeto a mejoras acotadas y sistemas con potencial volumétrico que requieren una transformación mayor en tratamiento e infraestructura.

Tabla 22. Clasificación técnico-operacional preliminar

Categoría	Sistemas	Interpretación
Reúso existente o consolidable	PTAS Antofagasta; PTAS San Pedro de Coloso	Existe uso actual; se requiere fortalecer formalización, calidad y trazabilidad.
Potencial cercano con mejoras acotadas	PTAS Calama; PTAS Baquedano; PTAS Sierra Gorda	Tratamiento biológico disponible; requiere validar calidad, demanda, permisos e infraestructura.
Potencial volumétrico con transformación mayor	Emisario Antofagasta; Mejillones; Taltal; Tocopilla	El reúso exige incorporar tratamiento secundario o terciario y redefinir el esquema de disposición.

Fuente: elaboración propia. Esta clasificación constituye insumo para la Actividad 11.

Finalmente, la ruta secuencial de decisiones regulatorias e institucionales requeridas para tramitar y habilitar un proyecto de reúso se indica en la Tabla 23.

Tabla 23. Ruta de decisiones regulatorias e institucionales

Etapa	Decisión principal	Responsable líder	Producto	Brecha típica
1. Identificación del efluente	Origen, caudal, tratamiento y punto de disposición	Concesionaria / operador	Ficha técnica y registros	Datos incompletos o no homogéneos
2. Definición del uso	Uso industrial, riego, áreas verdes u otro	Promotor y usuario	Perfil de demanda	Uso no definido
3. Calidad requerida	Parámetros según exposición y destino	Autoridad sanitaria / ambiental	Criterio o norma aplicable	Ausencia de estándar integral por uso
4. Adecuación del tratamiento	Obras y proceso complementario	Titular del proyecto	Memoria y proyecto	Responsabilidad y financiamiento
5. Revisión concesional	Destino de disposición, modificación de obras o plan	Concesionaria / SISS	Decreto, FAT, plan de desarrollo	Incertidumbre sobre cambios requeridos
6. Evaluación ambiental y sanitaria	Permisos y condiciones de operación	SEA, SEREMI, organismos sectoriales	RCA y autorización sanitaria	Tramitación fragmentada
7. Acuerdo de suministro	Volumen, calidad, precio, continuidad y responsabilidad	Productor y usuario	Contrato o convenio	Titularidad y asignación de riesgos
8. Operación y fiscalización	Monitoreo, reporte, contingencias y sanciones	Operador, usuario y fiscalizadores	Programa de control	Competencias no integradas

Fuente: elaboración propia.

En atención a la operatividad de la ruta de decisiones, se propone una matriz RACI (Tabla 24) que permite distinguir al responsable directo de ejecutar una tarea (R), la identidad que aprueba o responsable finalmente (A), los organismos que deben ser consultados (C) y aquellos que deben mantenerse informados (I). La asignación es referencial y debe ajustarse al tipo de proyecto.

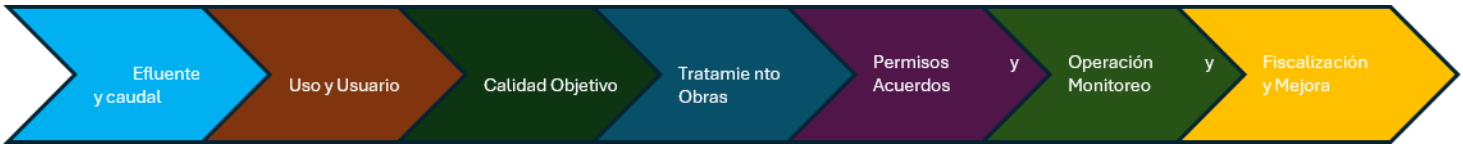
Tabla 24. Matriz RACI referencial para proyectos de reúso

Proceso	R	A	C	I
Definir uso y demanda	Usuario / promotor	Titular del proyecto	Municipio, GORE, sanitaria	Comunidad
Diseñar tratamiento adicional	Operador / consultor	Titular del proyecto	SISS, SEREMI, MMA	Usuario
Tramitar modificación sanitaria	Concesionaria	SISS / autoridad competente	SEREMI, SEA	Usuario
Tramitar permisos ambientales	Titular del proyecto	SEA / organismo competente	MMA, DIRECTEMAR, DGA	SISS, comunidad
Construir y operar obras	Contratista / operador	Titular del proyecto	Fiscalizadores sectoriales	Usuario y comunidad
Monitorear calidad y caudal	Operador	Titular / autoridad competente	SISS, SEREMI	Usuario
Controlar destino y uso	Usuario y operador	Autoridad competente	SISS, municipio, SEREMI	GORE y comunidad

Fuente: elaboración propia.

La secuencia funcional que ordena las principales decisiones técnicas, regulatorias, operacionales y de fiscalización requeridas para habilitar un proyecto de reúso desde la caracterización del efluente hasta su seguimiento y mejora propuesta se sintetiza en la Figura 18.

Figura 18. Secuencia Funcional para habilitar un proyecto de Reúso



Fuente: elaboración propia. La secuencia integra decisiones técnicas, regulatorias y de gobernanza.

6.4 PROTOCOLO DE APLICACIÓN Y REGLA DE DECISIÓN

En este apartado se indica el procedimiento que permite transformar antecedentes heterogéneos en una evaluación comparable y justificable, bajo un protocolo paso a paso para aplicar la pauta de evaluación y procesar la información de cada sistema, tal como se indica en la Tabla 25.

Tabla 25. Protocolo de aplicación del modelo

Paso	Acción	Control	Producto
1	Seleccionar sistema	Confirmar que forma parte del sujeto de estudio	Ficha identificatoria
2	Validar antecedentes	Revisar vigencia, fuente y consistencia	Matriz documental
3	Aplicar criterios	Responder preguntas y asignar 0-3	Pauta completada
4	Revisar criterios críticos	Identificar puntajes 0 o 1 en calidad, habilitación o trazabilidad	Alerta crítica
5	Integrar por dimensión	Calcular puntaje y redactar fundamento	Perfil dimensional
6	Clasificar viabilidad	Aplicar umbrales y regla de exclusión	Categoría preliminar
7	Definir brechas y acciones	Asociar medida, responsable y prioridad	Plan de cierre

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 26 se detallan los umbrales de puntaje y las reglas de decisión que definen la clasificación de viabilidad (favorable, condicionada o desfavorable).

Tabla 26. Regla preliminar de clasificación de viabilidad

Puntaje	Categoría	Interpretación	Decisión sugerida
12 a 15	Favorable	Condiciones esenciales acreditadas; brechas menores	Proyecto de corto plazo o consolidación
8 a 11	Condicionada	Potencial existente con brechas corregibles	Estudios, obras, permisos y acuerdos
4 a 7	Desfavorable en el estado actual	Transformación mayor o ausencia de condiciones básicas	Evaluación estratégica de largo plazo
0 a 3	Información insuficiente	No existe base suficiente para decidir	Completar antecedentes

Fuente: elaboración propia. Los umbrales deberán validarse con expertos.

La ausencia de una serie completa de calidad, la falta de precisión sobre el destino concesional o la inexistencia de un usuario formal no debe ocultarse mediante promedios. Cuando un criterio crítico obtenga 0, el sistema no podrá clasificarse como favorable. Cuando obtenga 1, la clasificación máxima será condicionada. La pauta deberá incorporar una columna de confiabilidad de la evidencia: alta media o baja. La Tabla 27 presenta el criterio de calificación de la confiabilidad de la evidencia utilizada, garantizando la solidez de los antecedentes que respaldan cada puntaje.

Tabla 27. Tratamiento de la confiabilidad de la evidencia

Confiabilidad	Tipo de antecedente	Uso en la decisión
Alta	Documento oficial vigente, serie de monitoreo o contrato formal	Valoración directa
Media	Informe técnico parcial, antecedente institucional o interés verificable	Valoración con condición
Baja	Estimación, dato antiguo o antecedente no corroborado	No usar como único fundamento

Fuente: elaboración propia.

6.4.1 Aplicación preliminar del modelo de evaluación

Sobre la base de los puntos previamente desarrollados se desarrolla una aplicación preliminar, donde los puntajes corresponden a una primera aproximación cualitativa y no reemplazan la revisión de series de calidad, permisos, costos y contratos. En la Tabla 28 se muestran los resultados de la aplicación preliminar de la pauta a los nueve sistemas regionales, detallando los puntajes obtenidos por dimensión, con una escala de 0 a 3 por dimensión para un máximo de 15 puntos.

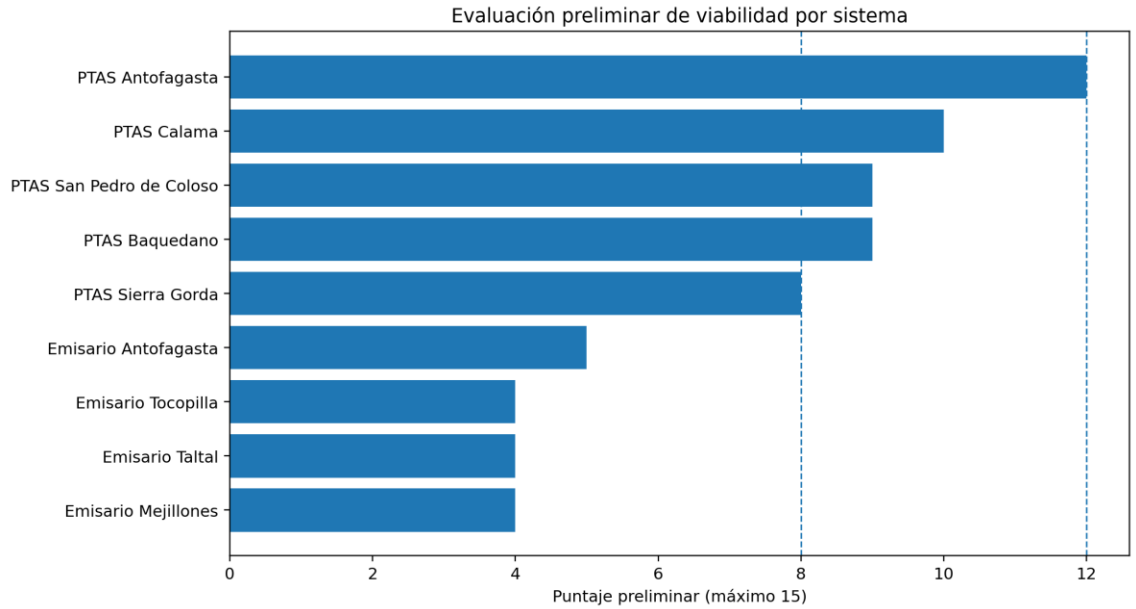
Tabla 28. Aplicación preliminar de la pauta

Sistema	Téc.	San.	Infra.	Norm./Gob.	Traz.	Total	Clasificación
PTAS Antofagasta	3	2	3	2	2	12	Favorable
PTAS Calama	2	2	2	2	2	10	Condicionada
PTAS Baquedano	2	2	2	2	1	9	Condicionada
PTAS Sierra Gorda	2	1	2	2	1	8	Condicionada
PTAS San Pedro de Coloso	2	2	2	2	1	9	Condicionada
Emisario Antofagasta	1	0	1	1	2	5	Desfavorable en estado actual
Emisario Mejillones	1	0	1	1	1	4	Desfavorable en estado actual
Emisario Taltal	1	0	1	1	1	4	Desfavorable en estado actual
Emisario Tocopilla	1	0	1	1	1	4	Desfavorable en estado actual

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 19 se puede apreciar la comparación de los puntajes preliminares de viabilidad obtenidos por los sistemas evaluados, permitiendo distinguir aquellos con condiciones más favorables para avanzar en reúso y aquellos que requieren superar brechas técnicas, regulatorias o de infraestructura antes de su implementación. Las líneas discontinuas representan los umbrales de 8 y 12 puntos.

Figura 19. Puntaje preliminar de viabilidad por sistema



Fuente: elaboración propia.

Se observa de la aplicación preliminar, que la PTAS Antofagasta obtiene la mejor posición relativa debido a la existencia de tratamiento secundario, un caudal relevante y una experiencia de reúso productivo. Sin embargo, la evaluación no es plena porque deben fortalecerse la acreditación de calidad para el uso final, la formalización de responsabilidades y la trazabilidad. Calama, Baquedano, Sierra Gorda y Coloso se ubican en una condición viable con restricciones, principalmente por la necesidad de validar calidad, demanda, infraestructura y mecanismos de control. Los emisarios presentan un alto valor volumétrico, pero su esquema de pretratamiento impide un uso directo y exige una transformación tecnológica mayor. La Tabla 29 sintetiza las principales fortalezas y debilidades asociadas a cada tipología tecnológica de tratamiento presente en la región.

Tabla 29. Fortalezas y debilidades por tipología

Tipología	Fortaleza principal	Debilidad principal
PTAS con tratamiento secundario	Efluente más próximo a calidad de reúso; operación conocida	Variabilidad de calidad, infraestructura adicional, permisos y contratos
Lombrifiltro de pequeña escala	Reúso local, bajo volumen, proximidad al usuario	Control microbiológico, continuidad y formalización
Emisarios submarinos	Alto volumen y potencial de sustitución de fuentes	Tratamiento insuficiente, inversión elevada, cambio del sistema de disposición

Fuente: elaboración propia.

Conforme a la interpretación de los resultados preliminares de la aplicación del modelo, se distinguen oportunidades de corto plazo de transformaciones estructurales, que se traducen en prioridades de gestión y lineamientos de mejora, de esta forma en la Tabla 30 se resumen los sistemas regionales priorizados y se establecen las líneas de acción de corto, mediano y largo plazo necesarias para el cierre de brechas.

- Implementar un programa regional de caracterización de efluentes orientado a usos específicos y no solo a normas de descarga.
- Priorizar proyectos en instalaciones con tratamiento secundario y usuarios cercanos antes de abordar transformaciones integrales de emisarios.
- Definir un protocolo común de permisos, responsabilidades y trazabilidad para evitar decisiones caso a caso sin coordinación.
- Vincular el financiamiento de obras adicionales con el beneficiario principal del agua reutilizada.
- Incorporar medición de caudal, calidad y destino como condición mínima de fiscalización.
- Conformar una mesa técnica regional con liderazgo definido y participación de autoridades sanitarias, ambientales, regulatorias, territoriales y usuarios.

Tabla 30. Matriz de brechas y acciones de cierre

Prioridad	Sistema	Línea de acción	Horizonte	Condición de avance
1	PTAS Antofagasta	Consolidación de reúso existente	Alta	Calidad, contrato, trazabilidad y fiscalización
2	PTAS Calama	Proyecto productivo condicionado	Media-alta	Demanda, calidad objetivo, conducción y permisos
3	PTAS Baquedano / Coloso	Fortalecimiento de reúso local	Media	Formalización, monitoreo y continuidad
4	PTAS Sierra Gorda	Mejora operacional y reúso local/productivo	Media	Carga orgánica, lodos, calidad y usuario
5	Emisario Antofagasta	Proyecto estructural de alto volumen	Largo plazo	Tratamiento avanzado, inversión y red de entrega
6	Emisarios Mejillones, Taltal y Tocopilla	Evaluación de alternativas territoriales	Largo plazo	Demanda, escala, tratamiento y financiamiento

Fuente: elaboración propia.

6.4.2 Integración e interpretación de resultados

La integración de los resultados permite establecer qué condiciones explican la viabilidad y cuales deben ser incorporadas en la propuesta técnico-regulatoria y de fiscalización. La Tabla 31 ofrece una síntesis integrada de los resultados, vinculando las fortalezas y brechas criticas destacadas con sus implicancias para la propuesta.

Tabla 31. Síntesis integrada de resultados

Dimensión	Fortaleza	Brecha crítica	Implicancia
Técnica-operacional	Existen sistemas con tratamiento secundario y caudales aprovechables.	Los emisarios concentran volumen, pero no calidad de reúso.	Priorizar PTAS y planificar transformación gradual de emisarios.
Sanitaria-ambiental	El tratamiento biológico aproxima el efluente a usos no potables.	Faltan estándares por uso y series de calidad representativas.	Aplicar enfoque apto para el propósito y gestión de riesgo.
Infraestructura	Algunos sistemas poseen conducción o reúso local.	La entrega a nuevos usuarios requiere estanques, impulsión y medición.	Incorporar ingeniería y costo desde la etapa de prefactibilidad.
Normativa-gobernanza	Existen competencias sectoriales y experiencias previas.	Persisten incertidumbres sobre titularidad, destino, permisos y liderazgo.	Crear una ruta única y una instancia de coordinación.
Fiscalización-trazabilidad	La SISS dispone de experiencia en control de PTAS y descargas.	El reúso requiere seguir volumen, calidad, destino y usuario.	Diseñar programa específico de monitoreo y reporte.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que el potencial regional no es homogéneo. Las mejores condiciones de corto plazo se encuentran en las plantas con tratamiento secundario y experiencias de reúso ya existentes. Los emisarios submarinos

representan una reserva hídrica de gran magnitud, pero su aprovechamiento requiere nuevas plantas, inversiones significativas, infraestructura de conducción y una demanda suficiente que justifique el cambio. En consecuencia, la estrategia regional debe coordinar acciones de consolidación inmediata con proyectos estructurales de largo plazo. En la Tabla 32 se delinea la estrategia temporal de aprovechamiento regional, ordenando la intervención de los sistemas en horizontes de corto, mediano y largo plazo.

Tabla 32. Estrategia temporal de aprovechamiento regional

Horizonte	Estrategia	Sistemas	Condiciones
Corto plazo	Consolidar reúso existente y usos locales	PTAS Antofagasta, Baquedano, Coloso	Monitoreo, formalización, trazabilidad
Mediano plazo	Habilitar nuevos usuarios productivos	PTAS Calama y Sierra Gorda	Calidad objetivo, demanda, obras y permisos
Largo plazo	Recuperar descargas marinas	Emisarios Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla	Tratamiento avanzado, financiamiento y red regional

Fuente: elaboración propia.

La aplicación preliminar permite responder que el reúso de aguas servidas tratadas es viable en la Región de Antofagasta, pero de manera diferenciada y condicionada. No existe una solución única para todos los sistemas. La viabilidad depende de la convergencia entre caudal, calidad, tratamiento, infraestructura, usuario, permisos, financiamiento, coordinación y fiscalización. La inexistencia de agua tratada constituye una condición necesaria, pero no suficiente. La Tabla 33 sintetiza la respuesta integrada al problema de investigación, resumiendo los hallazgos sobre potencial, barreras y prioridades regionales.

Tabla 33. Respuesta integrada al problema de investigación

Pregunta	Respuesta resultante	Base del resultado
¿Existe potencial técnico?	Sí, especialmente en PTAS con tratamiento secundario y en caudales marinos de alto volumen.	Diagnóstico técnico y aplicación preliminar.
¿El potencial es inmediatamente utilizable?	Solo en casos acotados; la mayoría requiere medidas adicionales.	Clasificación de viabilidad.
¿Cuál es la barrera dominante?	La interacción entre calidad para uso, infraestructura, incertidumbre normativa y coordinación.	Matriz de brechas.
¿Qué debe contener la propuesta final?	Criterios de calidad, ruta de permisos, roles, financiamiento, trazabilidad y fiscalización.	Actividades 7, 9, 10 y 12.
¿Cuál es la prioridad regional?	Consolidar experiencias existentes, habilitar PTAS interiores y evaluar gradualmente emisarios.	Priorización temporal.

Fuente: elaboración propia.

6.5 ESTRATEGIA TÉCNICO-REGULATORIA Y DE FISCALIZACIÓN

La estrategia propuesta busca establecer una secuencia de acciones que permita avanzar desde experiencias aisladas hacia un sistema regional predecible, trazable y escalable. La propuesta se estructura en tres componentes: marco habilitante, gobernanza e implementación y fiscalización con seguimiento.

- **Marco habilitante y lineamientos técnicos diferenciados por uso**

El primer componente consiste en establecer reglas mínimas comunes para evaluar proyectos. La regulación debe distinguir la descarga del reúso y adoptar un enfoque de calidad según uso final y nivel de exposición. Para cada categoría de uso se deberían definir parámetros, frecuencia de monitoreo, tratamiento mínimo, barreras de seguridad, restricciones operacionales y procedimiento de suspensión cuando la calidad no sea acreditada. Los parámetros definitivos deberán ser establecidos por la autoridad competente y validados mediante evaluación de riesgo.

La propuesta recomienda iniciar con usos no potables: minería e industria, riego de áreas verdes, lavado de calles, control de polvo y otros usos urbanos sin contacto directo. La incorporación de usos agrícolas deberá evaluar salinidad, nutrientes, suelo, cultivo, exposición y efectos sobre usuarios aguas abajo. El reúso potable directo queda fuera de la primera etapa, debido a que requiere un estándar sanitario, tecnológico y social de mayor exigencia que excede los antecedentes disponibles. En la Tabla 34 se establecen los lineamientos técnicos y variables de control mínimas requeridas según el uso final asignado del efluente.

Tabla 34. Lineamientos técnicos diferenciados según uso final

Uso propuesto	Variables mínimas	Condición técnica	Control requerido
Riego de áreas verdes	Coliformes, turbiedad, SST, pH, salinidad, nutrientes	Secundario + desinfección; barreras de exposición	Horarios, señalización, control de aerosoles y suelo
Uso urbano no potable	Coliformes, turbiedad, SST, desinfectante residual	Secundario/terciario según contacto	Red diferenciada, identificación y prohibición de conexión cruzada
Agricultura condicionada	Patógenos, salinidad, sodicidad, nutrientes, metales	Tratamiento según cultivo y modalidad de riego	Plan agronómico, trazabilidad y evaluación de cuenca
Recuperación ambiental	Calidad según cuerpo receptor y objetivo ecológico	Tratamiento caso a caso	Seguimiento ecosistémico y caudal objetivo

Fuente: elaboración propia.

Junto con los criterios de calidad, el marco habilitante debe precisar la disponibilidad jurídica del efluente, el responsable del tratamiento adicional, el punto en que se transfiere la responsabilidad y la relación entre el proyecto y los instrumentos concesionados, sanitarios y ambientales. Se propone que cada iniciativa cuente con una ficha única que reúna caudal, calidad, destino, usuario, permisos, obras, responsabilidades, monitoreo y contingencias. La Tabla 35 define los instrumentos regulatorios e institucionales que componen el marco habilitante propuesto.

Tabla 35. Instrumentos del marco habilitante

Instrumento	Contenido	Escala	Producto esperado
Definición jurídica del efluente	Aclarar disponibilidad, destino y efectos sobre terceros	Nacional	Base legal o criterio interpretativo formal
Estándares según uso	Establecer calidad, tratamiento y barreras de seguridad	Nacional/sectorial	Norma o reglamento técnico
Ficha única de proyecto	Integrar antecedentes y evitar tramitación fragmentada	Regional/proyecto	Expediente común y trazable
Responsabilidades contractuales	Definir calidad, continuidad, punto de entrega y riesgos	Proyecto	Contrato o convenio de suministro
Modificación de instrumentos	Determinar cambios en concesión, RCA, obras o monitoreo	Proyecto	Resolución o autorización aplicable

Fuente: elaboración propia a partir de las brechas regulatorias identificadas.

- **Gobernanza, coordinación y hoja de ruta de implementación**

Se propone constituir una Mesa Regional de Reúso de AST con carácter técnico y permanente. Su función será priorizar proyectos, coordinar antecedentes, resolver tempranamente incompatibilidades, mantener un catastro regional y dar seguimiento a compromisos. La mesa no sustituirá las competencias legales de cada organismo, sino que actuará como instancia de coordinación, trazabilidad y planificación.

La composición mínima debería considerar SISS, DGA, SEREMI de Salud, Ministerio del Medio Ambiente o su representación regional, DOH, Gobierno Regional, municipalidades, empresas sanitarias y operadoras, usuarios productivos y, según el proyecto, DIRECTEMAR, SEA, academia y comunidades. El liderazgo regional debe recaer en una entidad con capacidad de convocatoria y planificación territorial, mientras que cada autorización continuará bajo responsabilidad del organismo competente. En la Tabla 36 se detalla la estructura de gobernanza propuesta para la Mesa Regional del Reúso, especificando el rol estratégico de cada actor.

Tabla 36. Gobernanza propuesta para la Mesa Regional de Reúso

Actor	Responsabilidad estratégica	Producto o aporte
Gobierno Regional	Convocar, priorizar cartera y articular financiamiento	Secretaría técnica y cartera regional
SISS	Aportar información sanitaria, revisar impactos en concesión y fiscalización	Criterios técnicos, datos y seguimiento sectorial
SEREMI de Salud	Definir y controlar riesgos sanitarios según uso	Pronunciamiento sanitario y programa de control
DGA/DOH	Analizar balances, derechos, infraestructura y efectos territoriales	Informe hídrico e infraestructura pública
MMA/SEA/DIRECTEMAR	Revisar efectos ambientales y marinos según corresponda	Permisos y condiciones ambientales
Sanitaria/operador	Entregar efluente, diseñar y operar tratamiento y monitoreo	Proyecto, operación y reportabilidad
Usuario final	Acreditar demanda, financiar o cofinanciar y cumplir condiciones de uso	Contrato, instalaciones y control del destino
Municipio/comunidad	Definir necesidades, participar y controlar beneficios/externalidades	Participación y legitimidad territorial

Fuente: elaboración propia con base en la matriz de actores y el panel de expertos.

La Tabla 37 plantea la hoja de ruta para la implementación de la propuesta, dividida en cuatro fases temporales.

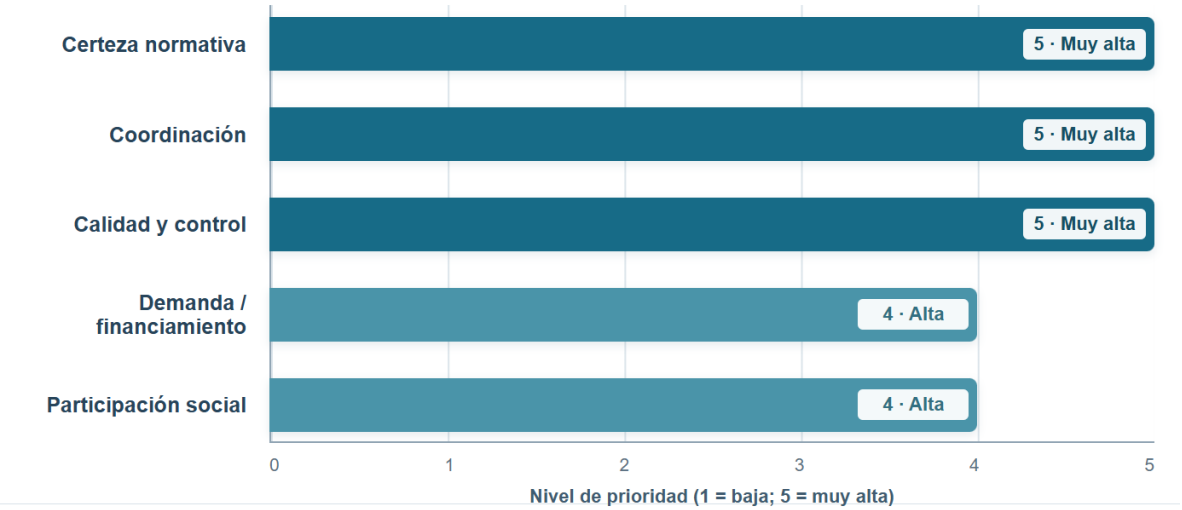
Tabla 37. Hoja de ruta de implementación

Horizonte	Fase	Acciones principales	Responsables
0-12 meses	Preparación	Constituir mesa, validar pauta, actualizar catastro, definir proyectos piloto	Gobierno Regional y organismos sectoriales
1-3 años	Pilotos y consolidación	Fortalecer PTAS con reúso existente; ejecutar pilotos en Calama, Baquedano, Sierra Gorda o Coloso	Titulares, usuarios y autoridades
3-5 años	Escalamiento	Formalizar estándares, contratos, financiamiento y sistemas de reporte	Nivel nacional y regional
5-10 años	Transformación estructural	Evaluar recuperación de emisarios con demanda y tratamiento avanzado	Estado, sanitarias y grandes usuarios

Fuente: elaboración propia.

La priorización de los principales ejes de implementación se presenta en la Figura 20, destacando como aspectos de mayor relevancia la certeza normativa, la coordinación institucional y la calidad de control, seguidos por la demanda y financiamiento, y la participación social.

Figura 20. Prioridad de los ejes de implementación



Fuente: elaboración propia a partir de la convergencia del panel de expertos y las brechas del modelo aplicado

- **Sistema de fiscalización, indicadores y mejora continua**

La fiscalización propuesta debe seguir el ciclo completo del efluente, desde la salida de la planta hasta el uso final. Para ello, cada proyecto deberá contar con puntos de control definidos, medición de caudal, programa de calidad, registro del usuario, trazabilidad del volumen entregado, protocolo de contingencia y obligación de reportar incumplimientos. La autoridad competente debe poder ordenar la suspensión del suministro cuando se pierdan las condiciones de calidad o exista un riesgo sanitario o ambiental.

Se recomienda una fiscalización basada en riesgo. Los proyectos con mayor exposición humana, variabilidad de calidad o complejidad de tratamiento deberán tener una frecuencia más alta de monitoreo e inspección. Los sistemas consolidados, con medición en línea y cumplimiento sostenido, podrán disminuir controles presenciales sin reducir la reportabilidad. Esta diferenciación permite concentrar recursos fiscalizadores donde existe mayor probabilidad o consecuencia de incumplimiento. En la Tabla 38 se define el cuadro de indicadores mínimos de seguimiento y fiscalización para evaluar el desempeño operacional y ambiental de los proyectos.

Tabla 38. Cuadro de indicadores para seguimiento y fiscalización

Dimensión	Indicador	Unidad	Frecuencia	Responsable primario
Disponibilidad	Volumen de AST producido y disponible	m³/mes y % medido	Mensual	Operador
Aprovechamiento	Volumen reutilizado respecto del disponible	%	Mensual/anual	Operador/usuario
Calidad	Cumplimiento de parámetros según uso	% muestras conformes	Según riesgo	Laboratorio/operador
Continuidad	Horas de suministro y eventos de interrupción	h/mes y N.° eventos	Mensual	Operador
Trazabilidad	Volumen con origen, destino y usuario acreditado	%	Mensual	Operador/usuario
Gestión de riesgos	Eventos, suspensión y tiempo de respuesta	N.° y horas	Por evento	Operador/autoridad
Ambiental	Reducción de extracción o descarga	m³/año	Anual	Titular del proyecto
Económica	Costo total y tarifa o precio del agua regenerada	$/m³	Anual	Titular/usuario
Social	Reclamos, participación y publicación de resultados	N.° y % cumplimiento	Trimestral/anual	Promotor/municipio

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 39 presenta el esquema de fiscalización graduado según el nivel de riesgo sanitario y operacional del proyecto.

Tabla 39. Esquema de fiscalización basado en riesgo

Nivel de riesgo	Condición referencial	Respuesta fiscalizadora
Bajo	Uso industrial cerrado; calidad estable; monitoreo continuo	Revisión documental mensual e inspección anual
Medio	Riego urbano o agrícola restringido; variabilidad moderada	Monitoreo reforzado e inspección semestral
Alto	Exposición pública, falla recurrente o tratamiento complejo	Control frecuente, auditoría y plan de contingencia activo
Crítico	Incumplimiento microbiológico, trazabilidad perdida o riesgo inmediato	Suspensión, notificación y medidas correctivas antes de reinicio

Fuente: elaboración propia.

La estrategia deberá revisarse anualmente mediante un ciclo de mejora continua: actualización del catastro, evaluación de indicadores, análisis de incidentes, revisión de criterios, priorización de inversiones y publicación de resultados. De este modo, la pauta propuesta no se limita a autorizar proyectos, sino que funciona como instrumento de aprendizaje institucional y planificación regional.

CAPITULO VII

RESULTADOS

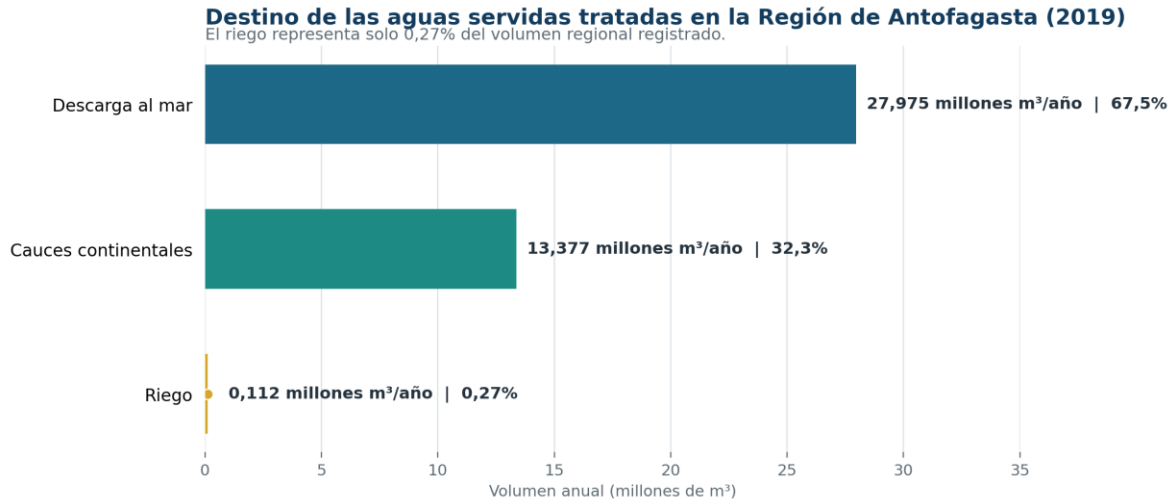
En este capítulo se indican los resultados que fundamentan la propuesta de una Pauta Técnico-Regulatoria y de Fiscalización para el Reúso de AST en Antofagasta. Los resultados parciales de la investigación son integrados y conforme a ello los hallazgos se sistematizan según la función que cumplen dentro de la propuesta en términos de priorizar sistemas y proyectos, verificar su aptitud técnico-sanitaria, ordenar su habilitación regulatoria e institucional y definir un control trazable desde la generación del efluente hasta el uso final. De esta forma, se presentan los resultados de priorización técnico territorial, de las componentes de la pauta propuesta, de la regulación y de la gobernanza, que son finalmente integrados en la propuesta de pauta, junto al resultado de su aplicación preliminar.

7.1 Resultado de la base empírica: priorización técnico-territorial

El primer resultado relevante es la existencia de una brecha entre la capacidad instalada para tratar aguas servidas y su aprovechamiento posterior. En Chile, durante 2024 operaron 303 sistemas urbanos de tratamiento, los cuales procesaron aproximadamente 1.252 millones de m³/año. Sin embargo, solo un 6% del volumen tratado fue destinado a reúso directo, mientras que el 73% se descargó a cuerpos de agua superficiales continentales y el 21% al mar. Por consiguiente, el avance alcanzado en materia de saneamiento no se ha traducido proporcionalmente en valorización hídrica de los efluentes.

Esta diferencia se manifiesta con mayor intensidad en la Región de Antofagasta. Los antecedentes correspondientes a 2019 registran 41.463.124 m³/año de AST, distribuidos en 27.974.957 m³/año descargados al mar, 13.376.652 m³/año dispuestos en cauces superficiales continentales y 111.515 m³/año destinados a riego. En términos porcentuales, aproximadamente el 67.5% fue descargado al mar, el 32,3% a cauces continentales y solo el 0,27% se destinó a riego. Aunque estos antecedentes corresponden a una base histórica y no sustituyen la revisión de los caudales operacionales actuales, permiten demostrar que el reúso regional ha sido marginal respecto del volumen tratado. La Figura 21 representa la distribución del volumen regional de aguas servidas tratadas según su destino final, permitiendo visualizar la marcada predominancia de la descarga al mar frente a los cauces continentales y al riego.

Figura 21. Destino de las aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta, año 2019



Fuente: elaboración propia a partir del Informe Final de la Submesa de Reúso de Aguas Servidas Tratadas y Aguas Grises Tratadas (datos 2019).

En la Tabla 40 se expone la distribución cuantitativa del volumen regional de aguas servidas tratadas registrados en 2019 según su destino final.

Tabla 40. Distribución regional del volumen de AST según destino

Destino	Volumen (m³/año)	Volumen (millones de m³/año)	Participación
Descarga al mar	27.974.957	27,975	67,5%
Cauces superficiales continentales	13.376.652	13,377	32,3%
Riego	111.515	0,112	0,27%
Total regional	41.463.124	41,463	100%

Fuente: elaboración propia. Los porcentajes fueron redondeados, por lo que su suma puede presentar una diferencia menor respecto de 100%.

La descarga marina fue estimada como una fuente potencial de 0,93 m³/s, equivalente a una superficie regable aproximada de 3.684 hectáreas. No obstante, este caudal no representa agua inmediatamente disponible para reúso. Los emisarios submarinos de Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla operan principalmente con pretratamiento físico y fueron diseñados para la disposición y dilución marina. En consecuencia, su recuperación exige incorporar tratamiento secundario o terciario, desinfección, almacenamiento, impulsión, redes de distribución y sistemas de control.

La caracterización de nueve sistemas regionales permitió diferenciar tres condiciones. La primera corresponde a sistemas con reúso existente o consolidable, como la PTAS de Antofagasta y San Pedro de Coloso. La segunda corresponde a plantas con tratamiento biológico y un potencial próximo, como Calama, Baquedano y Sierra Gorda, cuyo aprovechamiento depende principalmente de acreditar la calidad, formalizar usuarios, completar infraestructura y definir permisos. La tercera reúne los emisarios submarinos, que concentran un potencial volumétrico elevado, pero requieren una transformación tecnológica y económica de mayor magnitud.

El hallazgo principal es que la magnitud del caudal y el grado de preparación para el reúso no mantienen una relación directa. La PTAS Antofagasta, con un caudal de referencia de 95 l/s y tratamiento mediante lodos activados, presenta mejores condiciones de implementación que el emisario de Antofagasta, cuyo caudal de referencia alcanza hasta 1.070 l/s, pero solo dispone de pretratamiento. Este resultado exige que la pauta separe dos decisiones: primero, estimar la oferta física de AST y, segundo determinar el volumen efectivamente regenerable según tratamiento, caudal, demanda, infraestructura, regulación y capacidad de control.

7.2 Resultado Metodológico: Hallazgos que definen los componentes de la pauta propuesta

La aplicación preliminar permitió comprobar que una decisión de reúso no puede sustentarse en un único indicador. Los sistemas fueron evaluados mediante cinco dimensiones: técnica-operacional, sanitaria-ambiental, infraestructura, normativa-gobernanza y fiscalización-trazabilidad, que operan de manera secuencial y complementaria. El resultado fue un sistema favorable, cuatro con viabilidad condicionada y cuatro con desfavorables en su estado actual; esta diferenciación valida la necesidad de que la pauta entregue una clasificación final, identifique brechas verificables y establezca medidas habilitantes antes de autorizar o promover un proyecto. La Figura 22 presenta de forma gráfica la distribución de los sistemas evaluados según la clasificación obtenida, permitiendo visualizar comparativamente en el nivel de viabilidad determinado en la aplicación preliminar.

La PTAS Antofagasta obtuvo 12 puntos de un máximo de 15, alcanzando la categoría favorable debido a la existencia de tratamiento secundario, caudal disponible, infraestructura y experiencia de reúso productivo. Sin embargo, esta clasificación no significa ausencia de brechas, ya que todavía deben fortalecerse la acreditación de la calidad para el uso final, la delimitación de responsabilidades y la trazabilidad de volumen entregado.

Figura 22. Clasificación preliminar de los sistemas regionales de aguas servidas tratadas según su viabilidad para el reúso



Fuente: elaboración propia a partir de la aplicación preliminar de la pauta técnico-regulatoria

La PTAS de Calama, Baquedano, Sierra Gorda y San pedro de Coloso obtuvieron 8 y 10 puntos, clasificándose como condicionadas. En estos sistemas las brechas son corregibles, pero requieren series representativas de calidad, usuarios formalmente identificados, infraestructura de regulación y entrega, permisos aplicables y mecanismos de fiscalización. El caso de San Pedro de Coloso resulta especialmente ilustrativo: aunque existe reúso local para riego, la evaluación permanece condicionada por la necesidad de fortalecer el seguimiento microbiológico y la trazabilidad. Esto demuestra que una experiencia en operación no puede considerarse consolidada únicamente porque utiliza el efluente.

Los emisarios de Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla obtuvieron entre 4 y 5 puntos, clasificándose como desfavorables en su estado actual. El factor que más reduce su evaluación es la insuficiencia del tratamiento para acreditar una calidad compatible con usos posteriores. A ello se agregan inversiones elevadas, ausencia de redes de entrega y falta de una demanda formal que permita sostener económicamente las obras requeridas. La Tabla 41 sintetiza los resultados de la clasificación final de los sistemas y las brechas principales que deben ser abordadas, donde los intervalos se mantienen cuando el antecedente disponible no informa un puntaje individual exacto.

Tabla 41. Clasificación y brechas principales de los sistemas regionales

Sistema o grupo	Puntaje	Clasificación	Brechas o condición principal
PTAS Antofagasta	12/15	Favorable	Fortalecer calidad según uso, responsabilidades y trazabilidad del volumen entregado.
PTAS Calama, Baquedano, Sierra Gorda y San Pedro de Coloso	8–10/15	Viabilidad condicionada	Acreditar calidad, formalizar usuarios, completar regulación y entrega, definir permisos y fiscalización.
Emisarios de Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla	4–5/15	Desfavorable en su estado actual	Incorporar tratamiento adicional, infraestructura de entrega, demanda formal y financiamiento.

Fuente: elaboración propia a partir de la pauta técnico-regulatoria.

En la Tabla 42 se resumen los hallazgos integrados por dimensión y las exigencias normativas y técnicas derivadas de la pauta.

Tabla 42. Síntesis de los principales resultados integrados

Dimensión	Hallazgo integrado	Exigencia derivada para la pauta	Decisión que debe habilitar
Disponibilidad hídrica	La oferta regional es relevante, pero está mayoritariamente descargada y no equivale a agua disponible para uso.	Caracterizar origen, caudal, continuidad, destino actual y demanda territorial.	Priorizar sistemas y proyectos con oferta utilizable y demanda identificada.
Técnica y sanitaria	El tratamiento y la calidad según uso pesan más que el caudal bruto.	Verificar proceso, desinfección, parámetros críticos, riesgo de exposición y cumplimiento por uso.	Determinar aptitud, tratamiento adicional y condiciones de operación.
Infraestructura y economía	La cercanía, estabilidad y capacidad de pago de la demanda condicionan la sostenibilidad.	Evaluar almacenamiento, conducción, medición, costos, financiamiento y continuidad del usuario.	Definir viabilidad material y horizonte de implementación.
Normativa y gobernanza	Los proyectos se resuelven caso a caso por ausencia de una ruta común y responsabilidades claras.	Identificar permisos, organismos, disponibilidad jurídica, operador, usuario y mecanismos de coordinación.	Establecer habilitación institucional y responsables por etapa.
Fiscalización y trazabilidad	El control limitado a la descarga no permite verificar entrega ni destino.	Fijar puntos de control, frecuencia, registros, indicadores, alertas y acciones correctivas.	Autorizar, condicionar, suspender o corregir sobre evidencia verificable.
Participación social	La aceptación depende del uso, exposición, percepción de riesgo y transparencia.	Incorporar información temprana, gestión de riesgos y mecanismo de comunicación y reclamos.	Fortalecer legitimidad y prevenir rechazo social del proyecto.

Fuente: elaboración propia.

7.3 Resultado Regulatorio: Cumplir una norma de descarga no acredita aptitud para reúso.

El análisis normativo identificó una diferencia sustantiva entre cumplir una norma de descarga y demostrar aptitud para el reúso. El D.S. N°90/2000 establece limites según el cuerpo receptor, pero no constituye por sí mismo una norma integral de calidad para agua regenerada. Esta diferencia es particularmente relevante en descargas marinas fuera de la Zona de Protección Litoral, donde la Tabla 5 no exige control de coliformes fecales. En consecuencia, un efluente cumplir las condiciones de disposición y simultáneamente, no acreditar seguridad microbiológica para riego, usos urbanos o aplicaciones con exposición humana.

De esta forma, la principal brecha normativa no consiste en la ausencia de una ley específica, sino en la falta de articulación entre calidad según uso, disponibilidad jurídica del efluente, permisos, responsabilidades operacionales, financiamiento y fiscalización. Este resultado determina que la pauta incluya una ruta regulatoria verificable, con identificación de autorizaciones, organismos competentes, responsables por etapa y antecedentes mínimos de respaldo, evitando que cada proyecto dependa de interpretaciones o acuerdos particulares difíciles de replicar.

7.4 Resultado de Gobernanza: la viabilidad exige coordinación, responsabilidades y demanda estable.

Los resultados del panel de expertos refuerzan la necesidad de un componente de gobernanza dentro de la pauta. La primera ronda, analizada mediante un Delphi modificado y constituida por tres respuestas únicas, mostró convergencia temática en cinco condiciones habilitantes: certeza jurídico-regulatoria, incorporación del reúso en la planificación pública, coordinación interinstitucional, viabilidad económica sustentada en la demanda estable y participación social informada. Debido al tamaño del panel y la ausencia de una segunda ronda, estos resultados corresponden a convergencias preliminares y no a un consejo Delphi definitivo.; por ello, se utilizan como respaldo cualitativo para estructurar responsabilidades y mecanismos de coordinación, no como validación estadística del instrumento.

Las principales divergencias se concentraron en la evaluación de la institucionalidad vigente, el grado de obligatoriedad que debería tener el reúso, la priorización de usos finales y la coordinación jurídica de los efluentes. Estas diferencias no contradicen el diagnostico general, sino que delimitan las materias que requieren mayor definición antes de establecer una política regional o nacional aplicable de manera uniforme. La Tabla 43 conecta las condiciones habilitantes identificadas por el panel de expertos con los componentes de gobernanza de la propuesta.

Tabla 43. Condiciones habilitantes identificadas y función dentro de la viabilidad

Condición habilitante	Componente de gobernanza que debe incorporar la pauta	Riesgo que debe controlar
Certeza jurídico-regulatoria	Define calidad, permisos, titularidad y responsabilidades.	Proyectos caso a caso y baja replicabilidad.
Planificación pública	Integra oferta de AST con demanda y prioridades territoriales.	Iniciativas aisladas y sin continuidad.
Coordinación interinstitucional	Articula competencias sanitarias, ambientales, hídricas y territoriales.	Duplicidad, vacíos y mayores plazos.
Viabilidad económica	Sustenta tratamiento adicional, conducción, monitoreo y operación.	Infraestructura sin financiamiento o demanda estable.
Participación social informada	Construye legitimidad y permite gestionar percepción de riesgo.	Rechazo social aun cuando exista seguridad técnica.

Fuente: elaboración propia a partir de las convergencias temáticas de la primera ronda del panel de expertos.

7.5 Integración de los resultados en la propuesta de Pauta

La relación entre los resultados permite precisar la respuesta al problema de investigación: Antofagasta no carece de efluente ni de alternativas tecnológicas, sino de un procedimiento común que determine cuando un efluente puede pasar a la condición de agua regenerada y bajo que controles. Por ello, la pauta propuesta debe funcionar como un instrumento de decisión y seguimiento, capaz de vincular la evaluación técnico-sanitaria con la ruta regulatoria, la gobernanza del proyecto y la fiscalización de su operación.

La relación entre estos componentes se representa en la Figura 23, donde se observa cómo los resultados del análisis se integran en una estructura funcional compuesta por evaluación técnico-sanitaria, habilitación regulatoria y de gobernanza, fiscalización y trazabilidad, y una decisión final sobre la condición del proyecto.

En términos territoriales, los resultados muestran dos escalas de actuación. En el corto y mediano plazo, las mejores condiciones se encuentran en plantas con tratamiento secundario y usuarios próximos, debido a que las brechas pueden abordarse mediante mejoras acotadas de desinfección, almacenamiento, conducción, monitoreo y formalización. En el largo plazo, los emisarios representan la mayor oportunidad de recuperación hídrica, pero su aprovechamiento exige proyectos estructurales, inversiones significativas y una demanda estable capaz de justificar la transformación del actual sistema de disposición.

Figura 23. Estructura funcional de la pauta derivada de los resultados de la investigación



Fuente: elaboración propia.

La demanda aparece como una variable articuladora entre las dimensiones técnica y económica. Un caudal disponible no constituye por si mismo un proyecto viable si no existe un usuario que requiera el recurso con continuidad y que pueda asumir, total o parcialmente, los costos del tratamiento adicional y la infraestructura. En Antofagasta, la minería y la industria presentan mejores condiciones para actuar como usuarios habilitantes, mientras que el riego de áreas verdes y los usos municipales pueden generar beneficios ambientales y sociales, pero poseen menor capacidad para financiar inversiones.

Asimismo, los antecedentes muestran que la fiscalización tradicional centrada en el punto de descarga es insuficiente para controlar el reúso. El cambio de destino extiende la cadena de responsabilidades hacia el almacenamiento, la conducción, el punto de entrega, el usuario receptor y el uso final. En consecuencia, la pauta debe definir puntos críticos de control, parámetros y frecuencias de monitoreo, medición de caudal, registros de entrega, gestión de desviaciones y reporte de resultados, de manera que la trazabilidad sea verificable durante toda la operación. En la Tabla 44 se interpretan las relaciones sistemáticas que condicionan la viabilidad del reúso y las reglas que debe incorporar el instrumento.

Tabla 44. Interpretación de las relaciones que condicionan el problema de estudio

Relación observada	Significación para la propuesta	Regla o criterio que debe incorporar la pauta
Caudal disponible ↔ tratamiento	Un gran volumen con pretratamiento puede estar más lejos del reúso que un caudal menor con tratamiento secundario.	No priorizar solo por volumen; evaluar primero el volumen efectivamente regenerable.
Calidad ↔ uso final	La calidad exigible depende de la exposición y del riesgo del uso previsto.	Definir el uso antes de fijar tratamiento, parámetros y frecuencia de monitoreo.
Demanda ↔ infraestructura	La cercanía, continuidad y capacidad de pago del usuario determinan la sostenibilidad.	Exigir demanda formal y análisis de conducción, almacenamiento, costos y continuidad.
Permisos ↔ responsabilidades	La fragmentación genera incertidumbre sobre quién autoriza, opera y responde.	Asignar permisos, responsables, coordinación y medios de verificación por etapa.
Entrega ↔ fiscalización	El control del punto de descarga no permite seguir el agua hasta su destino.	Extender medición, registros, muestreo y control de desviaciones hasta el uso final.

Fuente: elaboración propia.

7.6 Resultado aplicado: arquitectura y producto de pauta propuesta

La sistematización permite convertir los hallazgos en una pauta compuesta por cuatro módulos conectados. El módulo técnico-sanitario establece la aptitud del efluente; el módulo regulatorio y gobernanza verifica la habilitación y asigna responsabilidades; el módulo de fiscalización define como controlar la operación; y el resultado de la evaluación clasifica la iniciativa e identifica medidas responsables, plazos y evidencias. La Tabla 45 muestra la trazabilidad entre los hallazgos diagnósticos y los contenidos de los cuatro módulos que componen la pauta.

Tabla 45. Matriz de trazabilidad entre hallazgos y contenidos mínimos de la pauta

Hallazgo que sustenta la propuesta	Módulo de la pauta	Verificación mínima	Producto esperado
La oferta física no equivale a volumen reutilizable.	Técnico-sanitario	Origen, caudal, continuidad, tratamiento, calidad según uso, demanda e infraestructura.	Ficha de caracterización y volumen efectivamente regenerable.
El cumplimiento de descarga no acredita aptitud para reúso.	Técnico-regulatorio	Parámetros críticos, exposición, tratamiento adicional, permisos y norma aplicable al uso.	Requisitos de calidad y ruta de habilitación.
La fragmentación institucional retrasa y vuelve poco replicables los proyectos.	Gobernanza	Competencias, titular u operador, usuario, financiamiento, coordinación y participación.	Matriz de responsables y mecanismo de coordinación.
El control en la descarga no asegura trazabilidad hasta el destino.	Fiscalización	Puntos de control, medición, muestreo, registros, reportes, alertas y acciones correctivas.	Plan de fiscalización y trazabilidad operacional.
Los sistemas presentan grados distintos de preparación.	Decisión final	Cumplimiento integral, brechas, medidas, responsables, plazos y medios de verificación.	Clasificación favorable, condicionada o no favorable.

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 46 se prioriza la aplicación de la pauta según el horizonte de implementación de los sistemas sanitarios regionales.

Tabla 46. Aplicación de la pauta por horizonte de implementación

Horizonte	Sistemas prioritarios	Resultado que sustenta la priorización	Aplicación de la pauta
Corto plazo	PTAS Antofagasta y experiencia de San Pedro de Coloso	Existe tratamiento biológico y experiencia de reúso; las brechas son acotadas y verificables.	Aplicar evaluación completa, cerrar brechas de calidad y formalizar trazabilidad y responsables.
Mediano plazo	PTAS Calama, Baquedano y Sierra Gorda	El potencial está condicionado por calidad representativa, demanda formal e infraestructura complementaria.	Emitir clasificación condicionada con plan de medidas, responsables, plazos y medios de verificación.
Largo plazo	Emisarios de Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla	Concentran la mayor oportunidad volumétrica, pero requieren transformación tecnológica y financiamiento estructural.	Usar la pauta en prefactibilidad para comparar usos, demanda, tratamiento, riesgos, permisos y gobernanza.

Fuente: elaboración propia

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

En este capítulo se integra los principales hallazgos y se organizan de acuerdo con las dimensiones que estructuraron el análisis. En primer término, se presenta la conclusión general y la respuesta al problema de la investigación; posteriormente, se desarrollan las conclusiones asociadas a la propuesta de la pauta, la gobernanza y coordinación institucional, la fiscalización y la trazabilidad, y la priorización territorial de los sistemas analizados. Finalmente, se formula un cierre global que sintetiza la contribución del estudio y las condiciones necesarias para avanzar hacia una implementación gradual, segura y fiscalizable del reúso de aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta.

8.1 Conclusión general y Respuesta al Problema de Investigación

La investigación permite concluir que la Región de Antofagasta dispone de una oferta relevante de aguas servidas tratadas que puede incorporarse a una gestión hídrica más diversificada. Los antecedentes de 2019 registran 41.463.124 m³/año de AST: aproximadamente 67,5 % se descargó al mar, 32,3 % se dispuso en cauces superficiales continentales y solo 0,27 % se destinó a riego. Esta distribución demuestra una valorización marginal del efluente; sin embargo, no permite afirmar que todo ese volumen sea inmediatamente reutilizable, porque la disponibilidad física no acredita por si sola, calidad, infraestructura, demanda, permisos ni condiciones de control. La aplicación preliminar a nueve sistemas confirmó la heterogeneidad. La PTAS Antofagasta alcanzó una condición favorable; Calama, Baquedano, Sierra Gorda y San Pedro de Coloso presentaron viabilidad condicionada; y los emisarios de Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla resultaron desfavorables en su estado actual. El mayor caudal potencial se concentra en sistemas costeros, pero las mejores condiciones de implementación se encuentran en plantas con tratamiento secundario y usuarios próximos. Por consiguiente, el potencial regional debe expresarse como volumen efectivamente regenerable y no como la suma de todas las descargas.

La respuesta al problema de investigación es, por tanto, que el reúso resulta viable cuando una misma decisión integra cinco condiciones: oferta estable, calidad apta para el propósito, infraestructura compatible, habilitación jurídica e institucional y fiscalización de la cadena completa. El principal obstáculo identificado no es la inexistencia de tecnología o caudal, sino la falta de un procedimiento común que determine cuando un efluente puede pasar desde una condición de tratamiento y disposición a una condición de agua regenerada, con responsabilidades y medios

de verificación definidos. Esta lógica de evaluación se sintetiza en la Figura 24, que representa la secuencia propuesta para transformar un efluente tratado en una iniciativa de reúso evaluable, condicionable y fiscalizable.

Figura 24. Arquitectura de la Pauta Técnico-Regulatoria y de Fiscalización propuesta



Fuente: elaboración propia.

La propuesta consolidada se estructura en cinco componentes secuenciales y complementarios, que permiten evaluar cada iniciativa de reúso desde su caracterización inicial hasta la decisión final y su seguimiento. Estos componentes abarcan la definición de caso del reúso, la verificación de la aptitud técnico-sanitaria e infraestructura, la habilitación regulatoria y la asignación de responsabilidades, el diseño de la fiscalización y la trazabilidad, y finalmente la clasificación de la iniciativa junto con las medidas de mejora requeridas. En conjunto, esta secuencia permite transformar antecedentes técnicos, regulatorios y operacionales en una decisión fundada, verificable y fiscalizable.

- **Propuesta consolidada de Pauta Técnico-Regulatoria y de Fiscalización**

La propuesta se estructura como una decisión y seguimiento, no como una lista de verificación aislada. Cada etapa genera un producto documental que alimenta la siguiente y permite reconstruir el fundamento de la clasificación final. Esta secuencia aporta consistencia entre proyectos, hace visible las brechas antes de comprometer inversiones y permite fiscalizar las condiciones que justifican la viabilidad.

- **Caracterización y definición del caso de reúso**

La evaluación debe comenzar con una ficha que identifique la fuente del efluente, el proceso de tratamiento, el caudal y su variabilidad, el destino actúa, la demanda acreditada, el uso final y la infraestructura existente. El producto no es una estimación genérica del potencial, sino una línea base que distingue la oferta física del volumen técnicamente regenerable y económicamente entregable.

- **Aptitud técnico-sanitaria e infraestructura**

Definido el uso, la pauta debe establecer la calidad requerida, los parámetros críticos, las series representativas, el tratamiento complementario, la desinfección, las barreras de seguridad, el almacenamiento, la conducción y las restricciones operacionales. La lógica es “apta para el propósito”: la exigencia se determina por el riesgo y la exposición del uso final, no únicamente por la calidad obtenida en el punto de descarga. La capacidad real de operación, mantenimiento, gestión de lodos y respuesta ante fallas forma parte de la aptitud, porque un diseño nominal sin soporte operacional no asegura desempeño sostenido.

- **Habilitación regulatoria, gobernanza y asignación de responsabilidades**

El módulo regulatorio debe identificar la situación jurídica del efluente, los permisos y pronunciamientos aplicables, el titular del proyecto, el operador, el usuario, el punto de transferencia de responsabilidad, el financiamiento y la calidad que actúa ante una desviación. La matriz de responsabilidades debe diferenciar quien ejecuta, autoriza dentro de sus atribuciones, fiscaliza, es consultado e informado. Así, la coordinación deja de depender de acuerdos informales y se convierte en una ruta con hitos, plazos y evidencias.

- **Fiscalización, trazabilidad y decisión**

El plan de fiscalización debe seguir el efluente desde la salida de la planta hasta el uso autorizado. Debe definir puntos de control, medición de caudal, programa de calidad, registros de entrega y recepción, indicadores, alertas, contingencias, comunicación de incidentes y acciones correctivas. La evaluación concluye en una clasificación favorable, favorable condicionada o no favorable en el estado actual, acompañada de los antecedentes revisados, brechas, medidas, responsables, plazos y medios de verificación.

La calidad según uso, la habilitación jurídica y la trazabilidad no deben diluirse en un puntaje agregado. Una ausencia o incumplimiento crítico en cualquiera de estos ámbitos impide una clasificación favorable; la falta de información debe registrarse como brecha y originar un requerimiento concreto, no presumirse como cumplimiento.

8.2 Conclusiones de gobernanza y coordinación regional

El panel de expertos y la bibliografía coinciden en que la viabilidad de reúso no depende de un organismo aislado. Requiere coordinación horizontal entre actores y coordinación vertical entre los niveles nacional, regional y local. La Mesa Regional de Reúso propuesta es pertinente en cuanto actúe como instancia técnica permanente para priorizar iniciativas, compartir información, advertir incompatibilidades, mantener un catastro y seguir compromisos, sin sustituir las competencias legales de la SISS, DGA, SEREMI, SMA, SEA, DIRECTEMAR, GORE, Municipalidades u otros organismos que correspondan.

La sola creación de una mesa no garantiza resultados. La literatura muestra que la coordinación efectiva surge de la combinación de instrumentos jerárquicos, incentivos económicos y trabajo en red, y que puede verse frustrada por asimetrías de poder, liderazgo insuficiente y capacidades institucionales débiles (Lukat et al., 2023). Por ello, la instancia regional debe contar con objetos, productos, responsables, plazos, reglas de seguimiento y una entidad convocante con capacidad real de planificación territorial.

La participación tampoco debe reducirse a información tardía o consulta formal. La distribución de beneficios, costos y riesgos del reúso puede ser desigual entre usuarios productivos, prestadores sanitarios, municipios y comunidades. Una gobernanza legitima debe considerar quien accede al reúso, quien financia las obras, quien asume los riesgos y que capacidad efectiva tienen los actores para influir en las decisiones (Gupta et al., 2023). La pauta debe registrar esta dimensión y exigir comunicación temprana, mecanismos de observación y respuesta pública frente a incidentes.

8.3 Conclusiones para la fiscalización y la trazabilidad

La fiscalización tradicional centrada en la descarga final resulta insuficiente para el reúso, porque el riesgo se desplaza y extiende etapas posteriores: tratamiento adicional, almacenamiento, conducción, entrega, distribución y uso. En consecuencia, la unidad de control debe ser la cadena completa del efluente. Cada proyecto debe definir puntos críticos, medición de caudal, programa de calidad, identificación del receptor, registros de entrega, gestión de desviaciones y condiciones para suspender el suministro cuando no se acredite la calidad o exista un riesgo sanitario o ambiental.

La fiscalización basada en riesgo es la alternativa más consistente para asignar recursos limitados de control. Los sistemas con mayor exposición humana, variabilidad de calidad, complejidad tecnológica o historial de desviaciones requieren mayor frecuencia de monitoreo e inspección. Los proyectos con medición continua, resultados estables, trazabilidad completa y capacidad demostrada de respuesta pueden reducir controles presenciales, pero no la obligación de reportar. El objetivo no es disminuir la fiscalización, sino concentrarla donde la probabilidad y consecuencia del incumplimiento son mayores.

La información oportuna y confiable es una condición de gobernanza, no un producto secundario. La evidencia internacional sobre contabilidad del agua muestra que la fragmentación, discontinuidad y baja integración de datos limitan su utilidad pública (Vardon et al., 2025). Por ello, la pauta debe exigir un registro regional compatible que integre volúmenes producidos, regenerados, entregados y efectivamente usados, calidad, costos, incidentes y medidas correctivas.

El monitoreo en línea, sensores y los sistemas de control pueden fortalecer la trazabilidad y alertar tempranamente sobre desviaciones. Sin embargo, la digitalización no reemplaza la gobernanza ni la verificación independiente; también introduce riesgos de calidad de datos, dependencia tecnológica, ciberseguridad y acceso desigual a la información (Alexandra et al., 2023). En consecuencia, la pauta debe establecer criterios de validación, respaldo, auditoria y disponibilidad de registros, además de definir qué información será pública y cual requerirá protección.

8.4 Conclusiones para la priorización territorial en Antofagasta

De los resultados obtenidos se deriva una estrategia de dos horizontes. En el corto y mediano plazo deben priorizarse plantas con tratamiento secundario, usuarios cercanos y brechas corregibles mediante desinfección, regulación, almacenamiento, conducción y control. En el largo plazo, los emisarios constituyen la mayor oportunidad volumétrica, pero requieren proyectos estructurales

respaldados por demanda estable, evaluación ambiental, financiamiento y una definición regulatoria robusta. Esta secuencia evita destinar recursos a proyectos de alto volumen aparente, pero sin condiciones reales de ejecución.

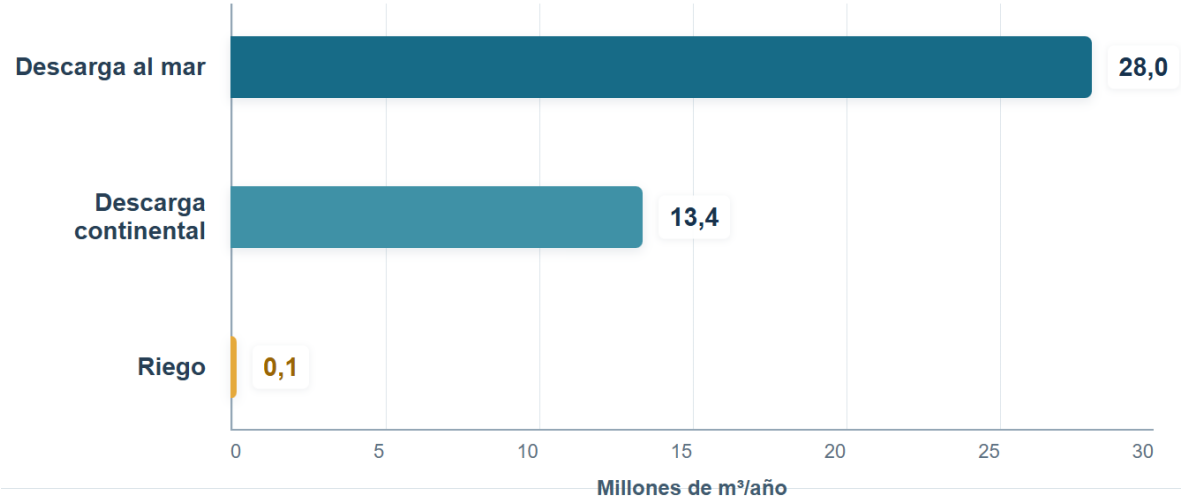
La demanda es la variable que concreta la oportunidad hídrica con viabilidad económica. La minería y la industria pueden actuar como usuarios habilitantes por su consumo estable y mayor capacidad de financiar tratamiento adicional e infraestructura. Los usos municipales y el riego de áreas verdes generan beneficios sociales y ambientales, pero normalmente requieren cofinanciamiento público o mecanismos explícitos de asignación de costos. La pauta debe prevenir que inversiones destinadas principalmente a usuarios productivos sean transferidas sin justificación a la tarifa residencial, y debe exigir que el modelo económico identifique beneficiarios, riesgos y responsabilidades.

8.5 Conclusiones económicas, ambientales y sociales

En términos económicos, el reúso no debe evaluarse únicamente mediante el costo unitario del tratamiento. La decisión debe incorporar el ciclo de vida completo: tratamiento adicional, energía, conducción, almacenamiento, reposición, monitoreo, gestión de lodos y contingencias. La viabilidad mejora cuando existe un usuario estable, cercano y con capacidad de pago, debido a que reduce el riesgo de demanda y permite estructurar contratos a largo plazo. Por esta razón, la minería y la industria aparecen como usuarios habilitantes para proyectos de mayor escala, mientras que el riego urbano, los municipios y las comunidades requieren esquemas de apoyo público o subsidio cruzado explícito.

Desde la dimensión ambiental, la región dispone de un volumen relevante de aguas servidas tratadas que actualmente se descarga principalmente al mar y cauces continentales. Los antecedentes de 2019 indican 41,46 millones de m³/año tratados, de los cuales 27,97 millones se descargaron al mar, 13,38 millones a cauce continentales y solo 0,11 millones fueron destinados a riego. Esta distribución confirma que el principal desafío que el principal desafío regional no es generar el recurso, sino transformar una fracción de la disposición final en una fuente segura controlada. La Figura 25 representa gráficamente la distribución del volumen regional según su destino, evidenciando la predominancia de la descarga al mar frente a la disposición continental y al riego.

Figura 25. Destino de las aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta



Fuente: elaboración propia con base en el Informe Final de la Submesa de Reúso de Aguas Servidas Tratadas y Aguas Grises Tratadas, datos 2019.

El beneficio ambiental del reúso se expresa en la reducción de extracción desde fuentes continentales o agua potable, la diversificación de la matriz hídrica y la disminución de descargas. Sin embargo, no debe asumirse que todo el reúso es ambientalmente favorable. Los proyectos deben demostrar que el consumo energético, la generación de lodos, la salinidad, los nutrientes, el transporte y los posibles efectos sobre usuarios aguas abajo no producen impactos superiores al beneficio obtenido.

En el ámbito social, la aceptación depende el uso final y del nivel de exposición. Los usos industriales, mineros y de riego de áreas verdes presentan mejores condiciones para una primera etapa, mientras el reúso potable directo no cuenta con respaldo suficiente dentro del alcance de la investigación. La participación ciudadana debe iniciarse antes de definir localización y usos, concentrándose en beneficios, riesgos, olores, control sanitario y mecanismos de respuesta, sin sustituir la responsabilidad técnica del diseño. En la Tabla 47 se analizan las implicancias económicas, ambientales y sociales del reúso, orientadas a garantizar la sostenibilidad de las iniciativas.

Tabla 47. Implicancias económicas, ambientales y sociales

Ámbito	Condición derivada	Implicancia para proyectos
Económica	Asegurar demanda y contrato de largo plazo	Reduce riesgo financiero y facilita inversión
Económica	Evaluar costo de ciclo de vida	Evita decisiones basadas solo en inversión inicial
Ambiental	Priorizar sustitución de fuentes convencionales	Genera beneficio hídrico verificable
Ambiental	Aplicar balance de impactos	Controla energía, lodos, salinidad y efectos territoriales
Social	Implementar participación temprana	Mejora legitimidad y permite gestionar externalidades
Social	Publicar calidad y cumplimiento	Fortalece confianza y control ciudadano

Fuente: elaboración propia.

8.6 Conclusión final

La propuesta de Pauta Técnico-Regulatoria y de Fiscalización constituye una respuesta pertinente y aplicable al problema estudiado, porque reconoce que el reúso de AST en Antofagasta no es exclusivamente una cuestión de tratamiento, sino una decisión de gestión hídrica integrada. Su valor reside en establecer un lenguaje común entre titulares, usuarios y autoridades, distinguir potencial físico de viabilidad efectiva, impedir que vacíos críticos sean ocultados por un puntaje global y extender el control desde la salida de la planta hasta el uso final.

La implementación debe comenzar por consolidar oportunidades de menor complejidad y mayor cercanía a usuarios, mientras se preparan proyectos estructurales para recuperar descargas marinas a largo plazo. Paralelamente se requiere avanzar en criterios de calidad por uso, certeza jurídica, coordinación regional, asignación transparente de costos y un sistema de fiscalización basado en el riesgo. Bajo estas condiciones, el reúso puede pasar de experiencias aisladas a una política regional trazable, gradual y escalable, capaz de contribuir a la seguridad hídrica sin debilitar la protección sanitaria, ambiental ni del acceso equitativo al recurso, resguardando que cada proyecto sea implementado con trazabilidad, responsabilidades definidas y niveles de protección compatibles con el destino efectivo de las aguas regeneradas.

Por último, sintetizar el logro del cumplimiento de objetivos de acuerdo con el cuadro siguiente (Tabla 48).

Tabla 48. Matriz de cumplimiento y trazabilidad de objetivos

Objetivo específico	Estado	Evidencia de cumplimiento
OE1 a OE3	Cumplido	Se consolidó una base técnica, normativa, institucional y empírica.
OE4	Cumplido	Se delimitó el sistema regional, sus instalaciones, actores y contexto.
OE5	Cumplido	Se integraron reúso, seguridad hídrica, economía circular y gobernanza.
OE6 a OE10	Cumplido	Se sistematizó información, definieron criterios, ruta y protocolo.
OE11 a OE12	Cumplido con alcance preliminar	Se aplicó el modelo y se priorizaron oportunidades y brechas.
OE13	Cumplido	Se establecen implicancias económicas, ambientales, sociales y de gobernanza.
OE14	Cumplido	Se traduce el diagnóstico en acciones, responsables, plazos e indicadores.

Fuente: elaboración propia.

CAPITULO IX

RECOMENDACIONES

En este capítulo se indica las recomendaciones derivadas de los resultados y conclusiones de la investigación, orientadas a fortalecer las condiciones necesarias para avanzar en su implementación. Para facilitar la aplicación, estas se organizan en cinco ámbitos complementarios institucional y regulatorio; técnico, operacional y de fiscalización; priorización territorial; económico, ambiental y social; y seguimiento y evaluación de resultados.

9.1 Alcance y criterio de priorización

Las recomendaciones transforman las conclusiones del estudio en una secuencia de acciones ejecutables. Su propósito no es reiterar que existe potencial de reúso, sino definir qué debe hacerse para convertir ese potencial en proyectos seguros, autorizables, financiables y fiscalizables. La prioridad se asigna según cuatro criterios: cierre de brechas críticas, factibilidad de implementación, capacidad de generar aprendizaje mediante pilotos y posibilidad de replicación territorial.

La pauta debe implementarse inicialmente como instrumento técnico de apoyo y no como autorización sustitutiva. Cada organismo conserva sus atribuciones y cada proyecto debe obtener los permisos y pronunciamientos que correspondan. Los horizontes propuestos se cuentan desde el inicio formal del proceso de implementación y deben reajustarse cuando la complejidad tecnológica, ambiental o jurídica lo justifique.

9.2 Recomendaciones institucionales y regulatorias

Se recomienda aprobar una versión piloto de la pauta que contenga una ficha única, los criterios de evaluación, las reglas críticas, las evidencias exigibles y la calificación final. Antes de su utilización permanente, esta versión debe incorporar especialistas técnicos, sanitarios, ambientales, jurídicos, económicos y fiscalizadores, y probarse con expedientes completos. La validación debe registrar acuerdos, disensos y cambios entre versiones, evitando modificar ponderaciones o umbrales sin fundamento documentado.

Se recomienda construir una Mesa Regional de Reúso con convocatoria del Gobierno Regional o del organismo público que se designe, y una secretaría técnica responsable del catastro, las actas, los plazos y el seguimiento. Deben participar los

organismos con competencias sanitarias, ambientales, hídricas, territoriales y de servicios sanitarios, además de titulares, operadores, usuarios y representantes territoriales cuando corresponda. La mesa no debe autorizar ni fiscalizar por sustitución; su función es ordenar la ruta, precisar los pronunciamientos requeridos, prevenir incompatibilidades y controlar compromisos.

Las brechas que no pueden resolverse mediante coordinación regional deben elevarse a una agenda técnica nacional. Por ello, la recomendación específica de formular una **Agenda Normativa Nacional.**

Esta agencia debiera abordar, al menos, la condición jurídica y disponibilidad del efluente; los estándares de calidad según uso y exposición; el punto de transferencia de responsabilidad; la secuencia de permisos; la distribución de costos e inversiones; el deber de informar; y las medidas aplicables ante pérdida de calidad o trazabilidad. La propuesta regional debe basarse en casos documentados para distinguir vacíos legales de problemas de gestión. La Tabla 49 presenta una matriz de recomendaciones estratégicas priorizadas para visibilizar la implementación de la pauta, cabe señalar que los responsables propuestos en ningún caso pueden atribuirse competencias legales por sobre aquellas que la ley permita.

Tabla 49. Matriz priorizada de recomendaciones para implementar la pauta

Prioridad	Acción recomendada	Responsable propuesto	Producto verificable
1. Validar la pauta	Revisar criterios, reglas no compensables, evidencias y clasificación mediante una segunda ronda del panel y talleres técnicos interinstitucionales. Aplicar control de versiones.	Mesa Regional de Reúso y equipo académico-técnico.	Pauta v1.0 validada, acta de acuerdos y registro de observaciones.
2. Actualizar el catastro	Levantar caudal, variabilidad, calidad, tratamiento, estado de obras, destino, demanda, contratos, permisos e incidentes de cada sistema regional.	Secretaría técnica regional, titulares y operadores.	Ficha única completa y base regional actualizada.
3. Definir calidad según uso	Construir matrices de parámetros, monitoreo, barreras, restricciones y criterios de suspensión según exposición y uso final, sin confundir cumplimiento de descarga con aptitud para reúso.	Autoridades sanitarias y ambientales competentes, con apoyo técnico sectorial.	Protocolo técnico-sanitario por categorías de uso.
4. Ejecutar pilotos	Seleccionar casos con tratamiento secundario, demanda formal y brechas corregibles; operar bajo expediente completo, trazabilidad y evaluación independiente.	Titular del proyecto, operador, usuario y organismos competentes.	Informe de desempeño del piloto y decisión fundada de continuidad.

Prioridad	Acción recomendada	Responsable propuesto	Producto verificable
5. Implementar trazabilidad	Relacionar producción, regeneración, almacenamiento, entrega, recepción, uso, pérdidas, calidad, alertas, incidentes y acciones correctivas mediante un registro auditable.	Operador y usuario; revisión por fiscalizadores dentro de sus atribuciones.	Balance mensual, registro de calidad y bitácora de contingencias.
6. Impulsar ajustes normativos	Sistematizar brechas sobre condición jurídica del efluente, permisos, responsabilidades, estándares por uso, financiamiento, intercambio de información y respuesta ante incumplimientos.	Organismos sectoriales de nivel regional y central.	Propuesta normativa y agenda de materias que requieren definición nacional.

Fuente: elaboración propia a partir de las conclusiones de la investigación.

9.3 Recomendaciones técnicas, operacionales y de fiscalización

Antes de clasificar un proyecto, se recomienda actualizar los antecedentes con una serie reciente que cubra al menos un ciclo anual de operación y ampliar el periodo cuando exista variabilidad relevante. El catastro debe separar caudal tratado, volumen técnicamente regenerable, volumen entregable y volumen efectivamente demandado. La demanda debe respaldarse mediante una manifestación formal del usuario que identifique consumo, continuidad, calidad requerida, punto de entrega, alternativa sustituida, obras necesarias y capacidad de financiar operación y reposición.

Cada iniciativa debe contar con un balance que relacione producción, tratamiento adicional, almacenamiento, pérdidas, entrega, recepción y uso. Este balance debe incluir incertidumbre metrológica y condiciones de estacionalidad, de modo que el volumen potencial no se confunda con agua realmente sustituible. La decisión debe descartarse o condicionarse cuando la demanda sea eventual, el usuario no pueda recibir el caudal o la infraestructura de condición represente una carga desproporcionada.

Se recomienda agrupar los usos por nivel de exposición y definir para cada categoría los parámetros críticos, el tratamiento complementario, las barreras, el monitoreo, las restricciones y los criterios de suspensión. Los usos industriales o mineros con circuito controlado, los usos urbanos con contacto limitado y los usos agrícolas o con mayor exposición no deben compartir automáticamente las mismas exigencias. Los valores numéricos deben ser fijados o aprobados por las autoridades competentes; la pauta debe ordenar su justificación y verificación, no crear limites regulatorios por si sola.

Los proyectos piloto deben operar con línea base, plan de puesta en marcha, muestreo de verificación, control independiente y evaluación de un ciclo operacional representativo. La aptitud debe considerar mantenimiento, energía, repuestos,

capacitación, lodos, olores, redundancia y respuesta ante fallas. La continuidad del reúso solo debe recomendarse cuando el desempeño real confirme las condiciones que justificaron su clasificación.

En este contexto, la recomendación específica de un **proceso de fiscalización integral**, completo, y no solo en el punto de descarga. Conforme a ello, se debe crear un expediente único por proyecto que vincule calidad, caudal, tratamiento, almacenamiento, transporte, entrega y uso efectivo. El plan de control debe identificar puntos de medición, responsables de muestreo, validación de datos, plazos de reporte, conservación de registros y acceso de los organismos competentes. La digitalización debe incluir respaldo, auditoria, control de cambios y medidas de ciberseguridad; los datos automáticos no reemplazan la inspección ni la verificación independiente (Alexandra et al., 2023; Vardon et al., 2025).

Deben activar medidas predefinidas situaciones del tipo pérdida de desinfección, una desviación crítica de calidad, la ausencia de trazabilidad, el uso fuera del destino autorizado o contingencia no controlada. La respuesta debe escalar desde la corrección y el monitoreo reforzado hasta la restricción o suspensión, según el riesgo. El reinicio requiere demostrar el restablecimiento de las barreras, identificar la causa y cerrar la medida correctiva con evidencia.

9.4 Recomendaciones para la priorización territorial

La priorización debe comenzar por sistemas con tratamiento secundario, demanda próxima y brechas corregibles. La PTAS Antofagasta ofrece la oportunidad inmediata de consolidar y auditar el reúso existente. Calama y las plantas interiores pueden aportar pilotos a escala acotada cuando acrediten usuario, calidad, permisos, continuidad y capacidad operacional. Los emisarios deben permanecer una prefactibilidad hasta demostrar que el beneficio hídrico y ambiental compensa el tratamiento, la energía, la impulsión y la inversión requeridos. Resulta de importante tener claro, que la priorización debe revisarse con antecedentes actualizados antes de adoptar decisiones de inversión. En la Tabla 50 se establece la programación territorial recomendada por grupos de sistemas e instalaciones.

Tabla 50. Aplicación territorial recomendada

Sistema o grupo	Horizonte	Acción prioritaria	Condición de avance
PTAS Antofagasta	Corto plazo	Consolidar el reúso existente: actualizar calidad por uso, verificar contratos, definir el punto de transferencia y auditar la trazabilidad volumétrica y sanitaria.	Expediente completo y cierre de brechas críticas.

Sistema o grupo	Horizonte	Acción prioritaria	Condición de avance
PTAS Calama	Corto a mediano	Actualizar series operacionales y demanda; evaluar tratamiento complementario, infraestructura de entrega, permisos, costos y un piloto de uso no potable controlado.	Demanda formal y factibilidad técnico-económica demostrada.
Baquedano, Sierra Gorda y San Pedro de Coloso	Mediano plazo	Priorizar soluciones locales cercanas a la planta, reforzando continuidad operacional, desinfección, almacenamiento, capacidad de mantenimiento y control del usuario.	Usuario identificado, operación sostenible y fiscalización factible.
Emisarios de Antofagasta, Mejillones, Taltal y Tocopilla	Largo plazo	Desarrollar prefactibilidad comparativa para recuperación, tratamiento secundario o terciario, energía, impulsión, almacenamiento, demanda estable y efectos ambientales netos.	Beneficio neto, financiamiento estructural y habilitación regulatoria.

Fuente: elaboración propia a partir de la aplicación preliminar de la pauta.

9.5 Recomendaciones económicas, ambientales y sociales

Todo proyecto debe incorporar costos de capital y operación, energía, personal, reactivos, reposición, monitoreo, contingencias, transporte y cierre. Se recomienda comparar alternativas durante el ciclo de vida y efectuar análisis de sensibilidad para caudal, demanda y precio de la energía. Los contratos deben asignar con claridad quien financia, opera, repone y responde ante interrupciones. No debe presumirse el traslado de inversiones a tarifas o subsidios sin una base jurídica y distributiva previamente acreditada.

La reducción de descargas y la sustitución de fuentes deben contrastarse con energía, emisiones, lodos, salinidad, nutrientes, transporte y posibles efectos sobre receptores o usuarios aguas abajo. Se recomienda comparar el proyecto con la situación sin reúso y con otras fuentes disponibles. La recuperación no debe calificarse como sostenible solo por reutilizar agua su el tratamiento adicional genera impactos netos superiores (Shiu et al., 2017).

Los usuarios, trabajadores y comunidades potencialmente expuestas deben recibir información temprana sobre origen, calidad, destino, riesgos, beneficios, costos y responsables. Se recomienda habilitar un mecanismo de observaciones, incidentes y respuesta con plazos públicos, además de publicar resultados consolidados sin afectar datos protegidos. La participación debe influir en la selección del uso y en las medidas de protección, evitando que beneficios y riesgos se distribuyan de forma desigual (Gupta et al., 2023).

La implementación recomendada integra en una **Hoja de Ruta** propuesta que se divide en cuatro fases. Cada fase termina con un producto verificable que habilita la siguiente; el simple transcurso del tiempo no constituye avance. Esta lógica reduce el riesgo de iniciar obras antes de contar con demanda, permisos, responsabilidades y capacidad de fiscalización. La Tabla 51 detalla la hoja de ruta por fases y los criterios de cierre requeridos para avanzar secuencialmente entre etapas, donde los horizontes se cuentan desde el inicio formal del proceso de implementación y deben ajustarse según la complejidad de cada proyecto.

Tabla 51. Hoja de ruta propuesta para la implementación

Fase	Horizonte	Acciones principales	Criterio de cierre
I. Preparación	0-12 meses	Constituir la instancia de coordinación; actualizar el catastro; validar la pauta; ejecutar la segunda ronda Delphi; seleccionar casos piloto y responsables.	Pauta v1.0, catastro completo y pilotos con expediente inicial.
II. Demostración	12-36 meses	Implementar pilotos; verificar calidad, balances, costos, incidentes y aceptación; capacitar operadores; auditar datos y cerrar brechas condicionantes.	Un ciclo operacional representativo evaluado y decisión documentada.
III. Consolidación	36-60 meses	Ajustar la pauta con evidencia; institucionalizar procedimientos; estructurar financiamiento; incorporar proyectos viables a la planificación regional.	Pauta v2.0 y cartera priorizada con responsables y financiamiento.
IV. Escalamiento	Más de 60 meses	Evaluar proyectos estructurales asociados a emisarios y redes regionales solo cuando exista demanda estable, beneficio neto y habilitación regulatoria.	Prefactibilidad aprobada antes de ingeniería e inversión.

Fuente: elaboración propia.

9.6 Seguimiento y evaluación de resultados

Se recomienda mantener un tablero regional con indicadores comunes, desagregados por proyecto y revisados por la instancia de coordinación. Los indicadores deben medir la integridad de la información, cumplimiento de condiciones críticas, desempeño operacional, respuesta ante incidentes y sustitución hídrica efectiva, también considerar que las metas que se señalan son criterios de gestión propuestos por esta investigación y no corresponden a límites legales, por lo tanto, deben validarse durante los pilotos que se desarrollen. En la Tabla 52 se resumen los indicadores mínimos de seguimiento, sus metas de gestión y la periodicidad de su verificación.

Tabla 52. Indicadores mínimos de seguimiento

Indicador	Forma de verificación	Meta propuesta	Periodicidad
Cobertura del catastro	Sistemas con ficha vigente / sistemas identificados.	100 % de los sistemas incluidos y actualización anual.	Anual
Integridad del expediente	Campos y evidencias obligatorias completos antes de clasificar.	100 % de los requisitos críticos acreditados.	Por decisión
Trazabilidad volumétrica	Conciliación entre volumen regenerado, almacenado, entregado, recibido y utilizado.	Diferencia dentro de la incertidumbre metrológica validada.	Mensual
Control de calidad	Resultados conformes con los criterios específicos del uso autorizado.	100 % en parámetros críticos; desviación activa restricción o suspensión.	Según riesgo
Cierre de medidas	Medidas correctivas cerradas con evidencia dentro del plazo.	100 % o justificación formal y reprogramación fundada.	Mensual
Incidentes críticos	Eventos con riesgo sanitario, ambiental u operacional no controlado.	Cero; todo evento debe notificarse, contenerse e investigarse.	Inmediata
Sustitución hídrica efectiva	Volumen de AST utilizado que reemplaza una fuente previamente identificada.	Meta definida por proyecto y acreditada mediante balance.	Mensual/anual
Competencia operacional	Personal autorizado con capacitación y evaluación vigente.	100 % antes de operar y actualización periódica.	Anual

Fuente: elaboración propia.

La decisión más inmediata para la Región de Antofagasta no consiste en promover indiscriminadamente nuevos proyectos, sino en adoptar una regla común para seleccionar, condicionar y controlar los casos que ofrecen beneficios demostrables. La pauta debe probarse primero en sistemas con tratamiento secundario y usuarios próximos, utilizando la experiencia obtenida para fortalecer la regulación, el financiamiento y la planificación de proyectos estructurales.

En consecuencia, se recomienda avanzar solo cuando el expediente acredite simultáneamente demanda real, calidad apta para el uso, infraestructura y operación sostenibles, habilitación regulatoria, responsabilidades definidas y trazabilidad hasta el destino final. Si una de estas condiciones críticas permanece abierta, la decisión correcta es condicionar o postergar el proyecto, identificando la medida, el responsable, el plazo y la evidencia necesaria para reconsiderarlo. Esta disciplina permitiría convertir el reúso en una herramienta efectiva de seguridad hídrica regional, sin trasladar incertidumbres técnicas, sanitarias, económicas o institucionales a la etapa de operación.

CAPITULO X

BIBLIOGRAFÍA

Asociación Chilena de Desalación y Reúso A.G. (2024). *Reúso de aguas residuales 2024*.

Asociación Chilena de Desalación y Reúso A.G. (2025). *Propuesta para alcanzar la seguridad hídrica*.

Alexandra, C., Daniell, K. A., Guillaume, J., Saraswat, C., & Feldman, H. R. (2023). Cyber-physical systems in water management and governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability, 62*, 101290. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2023.101290

Almuktar, S. A. A. A. N., Abed, S. N., & Scholz, M. (2018). Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: A review. *Environmental Science and Pollution Research, 25*, 23595–23623. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2629-3

Baeza, E. (2025). *Principios del reúso de aguas residuales y regulaciones en Chile y el extranjero*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Ballivian Searle, P. P. (2018). Reúso de aguas servidas tratadas: Desafíos en la regulación para un uso eficiente del recurso hídrico. *Revista de Derecho Aplicado LLM UC*, (2). https://doi.org/10.7764/rda.0.2.123

Cabrera Flamini, A., & Schwartz, K. (2025). Meeting multiple mandates: The increasing complexity of water utilities management. *Utilities Policy, 96*, 102033. https://doi.org/10.1016/j.jup.2025.102033

Charlton, M. B., & Arnell, N. W. (2011). Adapting to climate change impacts on water resources in England: An assessment of draft water resources management plans. *Global Environmental Change, 21*(1), 238–248. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.07.012

Chile. (1981). *Código de Aguas* (Decreto con Fuerza de Ley N.º 1.122).

Chile. (1988). *Ley General de Servicios Sanitarios* (Decreto con Fuerza de Ley MOP N.º 382).

Chile. (1990). *Ley N.º 18.902: Crea la Superintendencia de Servicios Sanitarios*.

Chile. (1994). *Ley N.º 19.300: Sobre Bases Generales del Medio Ambiente*.

Chile. (2018). *Ley N.º 21.075: Regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises*.

Chile, Ministerio de Obras Públicas. (1998). *Decreto Supremo N.º 609: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado*.

Chile, Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2000). *Decreto Supremo N.º 90: Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales*.

Chile, Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2002). *Decreto Supremo N.º 46: Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas*.

Chile, Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2009). *Decreto Supremo N.º 4: Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas*.

Delanka-Pedige, H. M. K., Cheng, X., Munasinghe-Arachchige, S. P., Bandara, G. L. C. L., Xu, P., Zhang, Y., & Nirmalakhandan, N. (2020). Conventional vs. algal wastewater technologies: Reclamation of microbially safe water for agricultural reuse. *Algal Research, 51*, 102022. https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102022

Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic Procedia, 4*, 1001–1007. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126

DIAgua. (2019). *Propuesta de marco regulatorio para el reúso de aguas servidas tratadas*.

Duhart Vera, D. (2016). *La institucionalidad de la gestión del agua en Chile* [Memoria de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143560

ECONSSA Chile S.A. (2024). *Licitación pública: Desarrollo declaración de impacto ambiental Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de 300 l/s, recinto ECONSSA Antofagasta: Bases técnicas* (revisión abril de 2024).

Eggimann, S., Truffer, B., Feldmann, U., & Maurer, M. (2018). Screening European market potentials for small modular wastewater treatment systems—An inroad to sustainability transitions in urban water management? *Land Use Policy, 78*, 711–725. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.031

Escenarios Hídricos 2030, Fundación Chile, Fundación Futuro Latinoamericano, & Fundación Avina. (2019). *Transición hídrica: El futuro del agua en Chile*.

Escenarios Hídricos 2030, & Fundación Chile. (2021). *Gobernanza desde las cuencas: Institucionalidad para la seguridad hídrica en Chile*.

Flores Díaz, M. G. (2016). *Agua desalinizada, ¿solución a la escasez hídrica en la ciudad de Antofagasta, Chile?: Incongruencia teórica-práctica en la aplicación de medidas para la conservación del recurso hídrico* [Memoria de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143587

Frappart, F., Minh, D. H. T., Baghdadi, N., Crétaux, J.-F., Fayad, I., & Bergé-Nguyen, M. (2024). Improving mean water lake surface elevation estimates using dense LiDAR measurements from the GEDI satellite mission. *Remote Sensing Applications: Society and Environment, 35*, 101213. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101213

Fundación Chile. (2017). *Desafíos del agua para la región latinoamericana*.

GHD, & ECONSSA Chile S.A. (s. f.). *Estudio del sistema de disposición final de aguas servidas de Antofagasta*.

Gupta, J., Pahl-Wostl, C., & Zondervan, R. (2013). “Glocal” water governance: A multi-level challenge in the Anthropocene. *Current Opinion in Environmental Sustainability, 5*(6), 573–580. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.09.003

Haasnoot, M., van Beek, E., van Deursen, W. P. A., Guillaume, J. H. A., Kwakkel, J. H., & Middelkoop, H. (2014). Fit for purpose? Building and evaluating a fast, integrated model to explore water policy pathways. *Environmental Modelling & Software, 60*, 99–120. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.020

Instituto Nacional de Normalización. (1978/1987). *NCh 1333.Of78, modificada en 1987: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos*.

Instituto Nacional de Normalización. (2015). *NCh 3456/2: Directrices para el uso de aguas residuales tratadas en proyectos de riego. Parte 2: Desarrollo del proyecto*.

Kerrigan Puig, G. W. (2025). *Evaluación de viabilidad técnico-normativa del sistema de saneamiento de aguas servidas "Los Almendros", con enfoque en el control de nitrógeno como contaminante* [Memoria de título, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio Institucional USM.

Langergraber, G., Pressl, A., Kretschmer, F., & Weissenbacher, N. (2018). Small wastewater treatment plants in Austria: Technologies, management and training of operators. *Ecological Engineering, 120*, 164–169. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.030

Lee, M., Yoon, J. H., Yang, J. E., Namkoong, S., & Kim, H. (2024). Stakeholder analysis for effective implementation of a water management system: The case of the groundwater charge in South Korea. *Heliyon, 10*, e24699. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24699

Lombardi, G. V., Stefani, G., Paci, A., Becagli, C., Miliacca, S., Gastaldi, M., Giannetti, B. F., & Almeida, C. M. V. B. (2019). The sustainability of the Italian water sector: An empirical analysis by DEA. *Journal of Cleaner Production, 227*, 1035–1043. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.283

Lukat, E., Lenschow, A., Dombrowsky, I., Meergans, F., Schütze, N., Stein, U., & Pahl-Wostl, C. (2023). Governance towards coordination for water resources management: The effect of governance modes. *Environmental Science & Policy, 141*, 50–60. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.12.016

Ruiz, R. (2024). Estrategia Nacional del Agua y opciones de políticas [Diapositiva de PowerPoint]. Repositorio Master of Water Management MWM 510. Universidad Técnica Federico Santa María. https://aula.usm.cl

Marangon, B. B., Silva, T. A., Calijuri, M. L., Alves, S. C., dos Santos, V. J., & Oliveira, A. P. S. (2020). Reuse of treated municipal wastewater in productive activities in Brazil's semi-arid regions. *Journal of Water Process Engineering, 37*, 101483. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101483

Marques, A. C., Veras, C. E., & Rodríguez, D. A. (2022). Assessment of the contribution of water policies to sustainable water resources management under climate change scenarios. *Journal of Hydrology, 608*, 127690. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127690

Maza Ávila, F. J., Navarro España, J. L., & Puello Payares, J. G. (2012). ¿Fue eficiente la asignación de recursos en el suministro de agua potable en el departamento de Bolívar–Colombia en el periodo 2007–2008? *Entramado, 8*(1), 58–70.

Mejías González, D. I. (2024). *Evaluación de la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos de Chile 2012–2025* [Tesina de magíster, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio Institucional USM. URL.

Ministerio de Obras Públicas. (s. f.). *Informe final de la Submesa de Reúso de Aguas Servidas Tratadas y Aguas Grises Tratadas* [Datos regionales de 2019].

Müller, A. B., Avellan, T., & Schanze, J. (2020). Risk and sustainability assessment framework for decision support in water scarcity–water reuse situations. *Journal of Hydrology, 591*, 125424. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125424

Mu'azu, N. D., Abubakar, I. R., & Blaisi, N. I. (2020). Public acceptability of treated wastewater reuse in Saudi Arabia: Implications for water management policy. *Science of the Total Environment, 721*, 137659. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137659

ONU-Agua. (2023). *Estudio de caso sobre la aceleración del país para el logro del ODS 6: Singapur*.

Paucar, F., & Iturregui, P. (2020). Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú. *South Sustainability, 1*(1), e004. https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-004

Peña-Arancibia, J. L., Ticehurst, C. J., Yu, Y., McVicar, T. R., & Marvanek, S. (2024). Feasibility of monitoring floodplain on-farm water storages by integrating airborne and satellite LiDAR altimetry with optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment, 302*, 113992. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.113992

Prieto Santa, A. L. (2025). *Tratamiento de aguas residuales: Calidad, operación y fiscalización* [Material técnico-docente].

Prošek, J., Vojar, J., Gdulová, K., Barták, V., Solský, M., Rocchini, D., & Moudrý, V. (2020). Integration of hyperspectral and LiDAR data for mapping small water bodies. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 92*, 102181. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102181

Quitana, G., Molinos-Senante, M., & Chamorro, A. (2020). Resilience of critical infrastructure to natural hazards: A review focused on drinking water systems. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 48*, 101575. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101575

Retamal, M. R., Andreoli, A., Arumí, J. L., Rojas, J., & Parra, O. (2013). Gobernanza del agua y cambio climático: Fortalezas y debilidades del actual sistema de gestión del agua en Chile. Análisis interno. *Interciencia, 38*(1), 8–16.

Reúso Salar del Carmen S.A. (2025). *Memoria anual 2025*.

Roth, D., Vink, M., Warner, J., & Winnubst, M. (2017). Watered-down politics? Inclusive water governance in the Netherlands. *Ocean & Coastal Management, 150*, 51–61. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.02.020

Salazar Gahona, P. A. (2025). *Evaluación del potencial de generación de hidrógeno verde a partir de las aguas residuales de la Región de Valparaíso* [Memoria de título, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio Institucional USM. https://repositorio.usm.cl/handle/123456789/76357.

Sánchez, J. M., & Sanhueza, R. (2000). Autonomía y regulación en el sector sanitario chileno. *Estudios Públicos, 77*, 165–185.

Shiu, H.-Y., Lee, M., & Chiueh, P.-T. (2017). Water reclamation and sludge recycling scenarios for sustainable resource management in a wastewater treatment plant in Kinmen Islands, Taiwan. *Journal of Cleaner Production, 152*, 369–378. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.110

Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology, 523*, 739–757. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013

Stein, U., Bueb, B., Knieper, C., Troltzsch, J., Vidaurre, R., & Favero, F. (2023). The diagnostic water governance tool: Supporting cross-sectoral cooperation and coordination in water resources management. *Environmental Science & Policy, 140*, 111–121. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.11.014

Suhaimi, A. H., Madon, R. H., Hamdan, M. A. H., Hairom, N. H. H., Mohd Makhtar, S. N. N., Mohd Salleh, Z., Abd. Jalal, M. Z., & Madon, R. M. H. (2024). Pilot-scale polluted river water treatment using membrane photocatalytic reactor incorporated ZnO-kaolin under different light intensities. [Artículo técnico].

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2022). *Informe de gestión del sector sanitario 2022*.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2024). *Informe de gestión del sector sanitario 2024*.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2025a). *Bases preliminares para el estudio tarifario 2026–2031 de Aguas Antofagasta S.A.*

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2025b). *Informe de gestión del sector sanitario 2025*.

Superintendencia de Servicios Sanitarios, & INECON. (2021). *Catastro de la reutilización de aguas servidas tratadas en el sector sanitario: Factibilidad técnica y legal de implementar proyectos de reutilización de aguas servidas tratadas del sector sanitario chileno*.

Superintendencia de Servicios Sanitarios, & SGS Chile Ltda. (2018). *Estudio 212: Calidad de efluentes SISS*.

Tratacal S.A. (2021). *Actualización Plan de Desarrollo 2021–2036: Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama*.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030*.

United States Environmental Protection Agency, & United States Agency for International Development. (2012). *2012 guidelines for water reuse*.

Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., & Valdés, J. B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology, 519*, 2538–2567. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016

Vardon, M. J., Le, T. H. L., Martínez-Lagunes, R., Pule, O. B., Schenau, S., May, S., & Grafton, R. Q. (2025). Accounting for water: A global review and indicators of best practice for improved water governance. *Ecological Economics, 227*, 108396. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108396

Von Pottstock Molina, M. A. O. E. (2021). *Rol de la Superintendencia de Servicios Sanitarios en la producción de agua desalinizada para consumo humano* [Actividad formativa equivalente a tesis de magíster, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186415

Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water, 2*(3), 530–549. https://doi.org/10.3390/w2030530

Wang, T., Zhu, B., & Zhou, M. (2019). Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central Sichuan Basin, China. *Journal of Hydrology, 570*, 839–849. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.034

Zhang, W., Li, Y., Wang, C., Wang, P., Wang, Q., & Wang, D. (2017). How could wastewater reuse in China meet the national ambitious water management strategy? *Desalination and Water Treatment, 76*, 319–327. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20230

CAPITULO XI

WEBGRAFÍA

A continuación, se detallan los portales institucionales y sistemas de información empleados para consultar normativas, datos sanitarios, cartografía, expedientes ambientales, antecedentes de infraestructura y publicaciones vinculadas con el reúso de las AST.

Asociación Chilena de Desalación y Reúso A.G.. (s. f.). *Portal institucional de ACADES*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://www.acades.cl/

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s. f.). *LeyChile: consulta de normativa nacional*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://www.bcn.cl/leychile/

Dirección General de Aguas. (s. f.). *Portal institucional de la Dirección General de Aguas*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://dga.mop.gob.cl/

Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas. (s. f.). *Repositorio de planificación e infraestructura*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/

ECONSSA Chile S.A.. (s. f.). *Portal institucional*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://www.econssachile.cl/

Escenarios Hídricos 2030. (s. f.). *Plataforma de estudios y propuestas para la seguridad hídrica*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://escenarioshidricos.cl/

ONU-Agua. (s. f.). *Portal de información y seguimiento del ODS 6*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://www.unwater.org/

Servicio de Evaluación Ambiental. (s. f.). *Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (e-SEIA)*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://seia.sea.gob.cl/

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (s. f.). *Portal institucional*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://www.siss.gob.cl/

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (s. f.). *Sistema de Información Territorial del sector sanitario*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://sit.siss.gob.cl/

United States Environmental Protection Agency. (s. f.). *Water Reuse Program*. Recuperado el 29 de julio de 2026, de https://www.epa.gov/waterreuse

CAPITULO XII

GLOSARIO Y ACRÓNIMOS

Concepto	Definición en la investigación
• **Agua regenerada**	AST acondicionada y controlada para un uso específico.
• **Aguas servidas tratadas (AST)**	Efluente tratado, no necesariamente apto para reúso.
• **Aptitud para el propósito**	Calidad y tratamiento adecuados al uso y riesgo.
• **Autocontrol**	Mediciones y registros realizados por el operador.
• **Calidad del efluente**	Características físicas, químicas y microbiológicas del agua tratada.
• **Caudal disponible para reúso**	Volumen de AST realmente utilizable.
• **Clasificación de viabilidad**	Calificación favorable, condicionada o no favorable.
• **Cumplimiento de descarga**	Verificación de límites exigidos para la disposición del efluente.
• **Demanda efectiva**	Necesidad de agua respaldada por un usuario concreto.
• **Disponibilidad física**	Existencia real del efluente en cantidad y ubicación determinadas.
• **Disponibilidad jurídica**	Habilitación legal para disponer y utilizar el efluente.
• **Economía circular del agua**	Recuperación y reúso del agua dentro del sistema.
• **Efluente**	Flujo líquido proveniente de un proceso de tratamiento.
• **Emisario submarino**	Infraestructura que descarga efluentes tratados al medio marino.

- **Evaluación multicriterio** Análisis conjunto de distintas variables de viabilidad.
- **Expediente de proyecto** Antecedentes que respaldan la evaluación y seguimiento del proyecto.
- **Fiscalización basada en riesgos** Control priorizado según probabilidad y consecuencias de fallas.
- **Gestión hídrica integrada** Manejo coordinado del agua, territorio, infraestructura y actores.
- **Gobernanza hídrica** Reglas, instituciones y actores que intervienen en la gestión del agua.
- **Infraestructura de reúso** Obras necesarias para tratar, conducir y entregar agua regenerada.
- **Mesa Regional de Reúso** Instancia propuesta de coordinación entre organismos competentes.
- **Monitoreo** Seguimiento sistemático del caudal, calidad y operación.
- **Norma de emisión** Límites de contaminantes permitidos en una descarga.
- **Pauta técnico-regulatoria y de fiscalización** Instrumento para evaluar y controlar proyectos de reúso.
- **Plan de contingencia** Acciones previstas para responder ante fallas o emergencias.
- **Punto de control** Lugar donde se verifica una variable crítica del sistema.
- **Reúso de AST** Aprovechamiento planificado del efluente tratado para un nuevo uso.
- **Riesgo sanitario, ambiental u operacional** Probabilidad y consecuencias de un evento adverso.
- **Seguridad hídrica** Disponibilidad confiable de agua en cantidad y calidad suficientes.

• **Trazabilidad**	Seguimiento del agua desde su origen hasta su uso final.
• **Tratamiento adicional o complementario**	Proceso destinado a alcanzar la calidad requerida para el reúso.
• **Tratamiento secundario**	Proceso biológico de remoción de materia orgánica y sólidos.
• **Tratamiento terciario o avanzado**	Tratamiento adicional para mejorar la calidad del efluente.
• **Uso final**	Destino específico asignado al agua regenerada.
• **Usuario ancla**	Demandante estable que sustenta la viabilidad del proyecto.
• **Volumen efectivamente regenerable**	Cantidad de AST que puede recuperarse sosteniblemente.

CAPITULO XIII

ANEXOS

El material que complementa y respalda el desarrollo de la tesina se incorpora como anexos bajo el siguiente listado.

Anexo A: Revisión y clasificación de antecedentes documentales.

Anexo B: Situación actual del tratamiento en la Región de Antofagasta

Anexo C: Antecedentes normativos de calidad de descargas

Anexo A. REVISIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ANTECEDENTES DOCUMENTALES.

A1. Antecedentes revisados para el desarrollo de la investigación

Id	Título	Autor / Institución	Fecha	Comentarios / Información relevante para la tesina
Ref.01	*Desafíos del Agua para la Región Latinoamericana*	Fundación Chile	2017	Entrega un marco general sobre seguridad hídrica, gestión por cuencas, cambio climático, sistemas complejos, huella hídrica y reúso de aguas residuales tratadas. Sirve para fundamentar el reúso como nueva fuente dentro de una gestión estratégica del agua.
Ref.02	*Gobernanza desde las cuencas: Institucionalidad para la seguridad hídrica en Chile*	Escenarios Hídricos 2030 / Fundación Chile	2021	Aporta el enfoque institucional y territorial para enfrentar la crisis hídrica desde las cuencas. Es útil para justificar que el reúso de AST debe insertarse en una gobernanza preventiva, adaptativa, participativa e inclusiva.
Ref.03	*La institucionalidad de la gestión del agua en Chile*	Daniela Duhart Vera, Universidad de Chile	2016	Documento jurídico-institucional clave para analizar dificultades del sistema chileno de gestión del agua, actores públicos y privados, competencias sectoriales, rol de la DGA y falencias institucionales.
Ref.04	*Principios del reúso de aguas residuales y regulaciones en Chile y el extranjero*	Eduardo Baeza / Biblioteca del Congreso Nacional	2025	Resume conceptos, principios y aplicaciones del reúso de aguas residuales. Aporta antecedentes sobre usos agrícolas, mineros, consumo humano, niveles de tratamiento y ausencia de una normativa chilena integral para reúso de AST a gran escala.
Ref.05	*Agua desalinizada, ¿solución a la escasez hídrica en la ciudad de Antofagasta, Chile?*	María Gracia Flores Díaz, Universidad de Chile	2016	Documento clave para contextualizar el caso territorial de Antofagasta. Analiza escasez hídrica, desalinización, gestión integrada del agua urbana y limitaciones de las soluciones basadas solo en aumento de oferta.
Ref.06	*Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile*	Escenarios Hídricos 2030 / Fundación Chile, Fundación Futuro Latinoamericano y Fundación Avina	2019	Aporta el marco nacional de transición hídrica. Propone ejes estratégicos vinculados a gestión e institucionalidad, conservación de ecosistemas, eficiencia hídrica e incorporación de nuevas fuentes de agua.
Ref.07	*Catastro de la Reutilización de AST en el Sector Sanitario. Factibilidad técnica y legal de implementar*	Superintendencia de Servicios Sanitarios / INECON	2021	Documento central para la tesina. Establece antecedentes técnicos y legales para implementar proyectos de reutilización de AST en el sector sanitario chileno.

	proyectos de reutilización de aguas servidas tratadas del sector sanitario chileno			Incluye diagnóstico de reutilización, catastro de sistemas, usuarios directos e indirectos, experiencias nacionales e internacionales y protocolo de información para empresas sanitarias.
Ref.08	*ESTUDIO_212 calidad de efluentes SISS*	Superintendencia de Servicios Sanitarios / SGS Chile Ltda.	2018	Contiene informes de terreno y análisis de laboratorio de efluentes de PTAS. Sirve para respaldar que el reúso exige verificar calidad del efluente mediante parámetros como pH, temperatura, caudal, DBO5, SST, fósforo, nitrógeno, aceites y grasas y coliformes fecales.
Ref.09	*Informe de Gestión del Sector Sanitario 2024*	Superintendencia de Servicios Sanitarios	2024	Entrega información actualizada del sector sanitario chileno: concesionarias, clientes, cobertura, infraestructura, tratamiento de aguas servidas, disposición de efluentes, reúso directo, fiscalización y desafíos sectoriales.
Ref.10	*Evaluación de viabilidad técnico-normativa del sistema de saneamiento de aguas servidas "Los Almendros", con enfoque en el control de nitrógeno como contaminante*	George Williams Kerrigan Puig, Universidad Técnica Federico Santa María	2025	Aporta una mirada aplicada sobre saneamiento, brechas normativas, calidad de efluentes, gestión de lodos y control de nitrógeno. Refuerza que el reúso requiere evaluar caudales, calidad, nutrientes, autorizaciones sanitarias, riesgos ambientales y factibilidad técnico-normativa.
Ref.11	*Evaluación de la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos de Chile 2012-2025*	Diego Ismael Mejías González, Universidad Técnica Federico Santa María	2024	Evalúa el grado de implementación de la ENRH mediante consulta a 23 profesionales vinculados a la gestión hídrica. Sus resultados indican 40% de medidas aplicadas, 43% parcialmente aplicadas y 17% no aplicadas. Es útil para sustentar brechas de planificación, seguimiento y evaluación de políticas públicas hídricas.
Ref.12	*Evaluación del potencial de generación de hidrógeno a partir de las aguas residuales de la Región de Valparaíso*	Paula Andrea Salazar Gahona, Universidad Técnica Federico Santa María	2025	Referencia metodológica para evaluar usos productivos de aguas residuales tratadas. Analiza 24 PTAS, aplica modelos de optimización espacial, proyecciones LSTM al 2030 y estimaciones de producción de hidrógeno verde. Es útil para adaptar criterios de oferta de AST, localización y demanda potencial.
Ref.13	*Rol de la Superintendencia de Servicios Sanitarios en*	María Alicia Olga Elena Von Pottstock Molina, Universidad de Chile	2021	Aporta una mirada jurídica sobre el rol regulatorio, fiscalizador, autorizador y sancionatorio de la

	la producción de agua desalinizada para consumo humano			SISS frente a nuevas fuentes como la desalación. Es útil para comparar desafíos regulatorios de desalación y reúso de AST.
Ref.14	*Gobernanza del agua y cambio climático: fortalezas y debilidades del actual sistema de gestión del agua en Chile. Análisis interno*	Ma. Rafaela Retamal, Andrea Andreoli, José L. Arumi, Jorge Rojas y Oscar Parra	2013	Artículo clave para el marco de gobernanza. Identifica fortalezas y debilidades del sistema chileno de gestión del agua, destacando la necesidad de avanzar hacia gestión integrada de cuencas y adaptación al cambio climático.
Ref.15	*Propuesta para alcanzar la seguridad hídrica*	Asociación Chilena de Desalación y Reúso A.G. ACADES	2025	Documento actualizado sobre fuentes no convencionales, desalación y reúso. Propone medidas institucionales, de gestión y legislativas para impulsar proyectos de agua de mar, agua desalada y reutilización de aguas residuales.
Ref.16	*Estudio de caso sobre la aceleración del país para el logro del ODS 6: Singapur*	ONU-Agua	2023	Caso internacional útil para comparar modelos exitosos de seguridad hídrica, reúso y planificación de largo plazo. Destaca el uso de NEWater, desalación, innovación, gobernanza, financiamiento, datos y educación.
Ref.17	*Tratamiento de aguas residuales: calidad, operación y fiscalización*	Ana Lucía Prieto Santa	2025	Material técnico-operacional sobre caracterización de aguas servidas, normativa de efluentes, tecnologías de tratamiento, operación, control, fiscalización, lodos, desinfección y olores. Refuerza la relación entre calidad de tratamiento y reúso seguro.
Ref.18	*2012 Guidelines for Water Reuse*	United States Environmental Protection Agency / USAID	2012	Referencia internacional técnica para proyectos de reúso. Aborda planificación, categorías de reúso, tecnologías, protección de salud pública, monitoreo, financiamiento, participación ciudadana y enfoque “fit for purpose”.
Ref.19	*Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú*	Flor Paucar y Patricia Iturregui	2020	Artículo jurídico-comparado latinoamericano. Analiza el reúso como respuesta a mayor demanda, menor disponibilidad, contaminación de cuerpos receptores y necesidad de recursos alternativos. Aporta antecedentes sobre regulación, gobernanza, financiamiento, ODS 6 y riesgos sanitarios del reúso sin tratamiento.
Ref.20	*Reúso de aguas servidas tratadas: desafíos en la regulación para un uso*	Pedro Pablo Ballivian Searle	2018	Artículo jurídico clave para Chile. Analiza escasez hídrica, nuevas fuentes, marco jurídico sanitario, discusión sobre propiedad y

	eficiente del recurso hídrico			disposición de las AST, y rol de la SISS, Contraloría y tribunales.
Ref.21	*Reuse of treated municipal wastewater in productive activities in Brazil's semi-arid regions*	Bianca Barros Marangon, Thiago Abrantes Silva, María Lúcia Calijuri, Sabrina do Carmo Alves, Vitor Juste dos Santos y Adriana Paulo de Sousa Oliveira	2020	Caso comparado latinoamericano sobre reúso de aguas residuales municipales tratadas en zonas semiáridas de Brasil para hidroponía, riego y piscicultura. Aporta metodología multicriterio para seleccionar tecnologías de tratamiento.
Ref.22	*Small wastewater treatment plants in Austria: Technologies, management and training of operators*	Günter Langergraber, Alexander Pressl, Florian Kretschmer y Norbert Weissenbacher	2018	Antecedente internacional sobre sistemas descentralizados y pequeñas PTAR. Releva tecnologías como lodos activados, humedales construidos y reactores secuenciales, además de la capacitación de operadores.
Ref.23	*Water reclamation and sludge recycling scenarios for sustainable resource management in a wastewater treatment plant in Kinmen islands, Taiwan*	Huan-Yu Shiu, Mengshan Lee y Pei-Te Chiueh	2017	Aporta enfoque de economía circular aplicado a PTAR, considerando recuperación de agua, reciclaje de lodos, energía y evaluación de ciclo de vida. Permite abordar aguas residuales como recurso y no como residuo.
Ref.24	*Pilot-scale polluted river water treatment using membrane photocatalytic reactor incorporated ZnO-kaolin under different light intensities*	Amirrul Hakim Suhaimi, Rais Hanizam Madon, Mohamad Alif Hakimi Hamdan, Nur Hanis Hayati Hairom, Siti Nurfatin Nadhirah Mohd Makhtar, Zuliazura Mohd Salleh, M. Zahar Abd. Jalal y Rais Mohd Hazri Madon	2024	Referencia secundaria sobre tecnologías avanzadas de tratamiento mediante reactor fotocatalítico de membrana. Puede apoyar la discusión sobre tratamientos complementarios para alcanzar calidades superiores de reúso.
Ref.25	*Public acceptability of treated wastewater reuse in Saudi Arabia: Implications for water management policy*	Nuhu Dalhat Mu'azu, Ismaila Rimi Abubakar y Nawaf I. Blaisi	2020	Fuente clave para la dimensión social del reúso. Analiza aceptabilidad pública en un país árido dependiente de aguas subterráneas y desalación, destacando la necesidad de educación, sensibilización y legitimidad social.
Ref.26	*Conventional wastewater technologies vs. algal wastewater technologies: Microbiologically safe water recovery for agricultural reuse*	H. M. K. Delanka-Pedige, X. Cheng, S. P. Munasinghe-Arachchige, G. L. C. L. Bandara, T. Schaubb, P. Y. Zhang y N. Nirmalakhandan	2020	Compara tecnologías convencionales y basadas en algas para recuperación de agua microbiológicamente segura en reúso agrícola. Aporta criterios sobre patógenos, bacterias resistentes, genes de resistencia y subproductos de desinfección.
Ref.27	*Risk and sustainability assessment framework for decision support in water scarcity – water reuse situations*	Andrea B. Müller, Tamara Avellan y Jochen Schanze	2020	Documento metodológico relevante. Integra evaluación de riesgo de escasez hídrica con evaluación de sostenibilidad de medidas de reúso, considerando

				dimensiones sociales, económicas y ambientales.
Ref.28	*Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: A review*	Suhad A. A. N. Almuktar, Suhail N. Abed y Miklas Scholz	2018	Revisión sobre humedales construidos para tratamiento de aguas residuales y posterior reciclaje del efluente. Aporta antecedentes sobre soluciones naturales, bajo costo de operación y bajo consumo energético
Ref.29	*Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage in the hilly area of the central Sichuan Basin, China*	Tao Wang, Bo Zhu y Minghua Zhou	2019	Artículo técnico sobre zanjas ecológicas para remoción de nutrientes en aguas residuales domésticas rurales. Aporta resultados de remoción de nitrógeno y fósforo, útil para discutir alternativas rurales o descentralizadas.
Ref.30	*Evaluating the European market potential for small modular wastewater treatment systems: A path towards sustainability transitions in urban water management?*	Sven Eggimann, Bernhard Truffer, Ulrike Feldmann y Max Maurer	2018	Analiza sistemas modulares y descentralizados de tratamiento de aguas residuales como alternativa al régimen centralizado tradicional. Es útil para discutir infraestructura flexible, escalable y adaptada a distintos territorios.
Ref.31	*Stakeholder analysis for effective implementation of a water management system: The case of the groundwater charge in South Korea*	Minha Lee, Jung Hwan Yoon, Jae E. Yang, Sim Namkoong y Heejung Kim	2024	Aporta metodología de análisis de actores y matriz poder-interés para estudiar implementación de políticas hídricas. Es útil para estructurar el análisis de actores del reúso: SISS, sanitarias, usuarios potenciales, industria, municipios, comunidades y servicios públicos.
Ref.32	*Governance towards coordination for water resources management: The effect of governance modes*	Evelyn Lukat, Andrea Lenschow, Ines Dombrowsky, Franziska Meergans, Nora Schütze, Ulf Stein y Claudia Pahl-Wostl	2023	Documento clave para gobernanza y coordinación intersectorial. Plantea que la GIRH requiere coordinación vertical entre niveles de gobierno y horizontal entre sectores como agua, agricultura, industria y minería.
Ref.33	*Cyber-physical systems in water management and governance*	Carla Alexandra, Katherine A. Daniell, José Guillaume, Chitresh Saraswat y Hannah R. Feldman	2023	Aporta una mirada sobre digitalización, sensores, inteligencia artificial, monitoreo, sistemas ciberfísicos y gobernanza del agua. Es relevante para trazabilidad, control operacional y seguimiento de calidad en proyectos de reúso.
Ref.34	*Water accounting: A global review and indicators of best practice for better water governance*	Michael J. Vardon, Thi Ha Lien Le, Ricardo Martínez-Lagunes, Ogopotse Batlokwa Pule, Sjörd Schenau, R. Quentin Grafton y Steve May	2025	Referencia reciente sobre contabilidad del agua. Señala que una gobernanza eficaz requiere información confiable y oportuna, aunque los datos suelen estar dispersos o incompletos. Útil para justificar catastros, balances, oferta de AST y trazabilidad.

Ref.35	*Watered-down politics? Inclusive water governance in the Netherlands*	Dik Roth, Martijn Vink, Jeroen Warner y Madelinde Winnubst	2017	Discute gobernanza inclusiva, participación ciudadana y procesos de decisión. Advierte que la participación puede volverse simbólica si las decisiones ya están tomadas o los actores no inciden realmente.
Ref.36	*The diagnostic water governance tool: Supporting cross-sectoral cooperation and coordination in water resources management*	Ulf Stein, Benedict Bueb, Christian Knieper, Jenny Troltzsch, Rodrigo Vidaurre y Fausto Favero	2023	Fuente metodológica para evaluar gobernanza del agua. Presenta una herramienta de diagnóstico que identifica brechas y propone recomendaciones para mejorar coordinación y cooperación intersectorial.
Ref.37	*Assessment of the contribution of water policies to sustainable water resources management under climate change scenarios*	Amanda Carneiro Marques, Carlos Eduardo Veras y Daniel Andrés Rodríguez	2022	Aporta metodología de evaluación de políticas hídricas bajo escenarios de cambio climático, usando modelos hidrológicos, escenarios de disponibilidad e índices de sostenibilidad.
Ref.38	*Adapting to climate change impacts on water resources in England: An assessment of draft Water Resources Management Plans*	Matthew B. Charlton y Nigel W. Arnell	2011	Documento comparado sobre planificación hídrica y adaptación climática. Analiza cómo empresas de agua incorporan cambio climático en planes a 25 años, equilibrio oferta-demanda y medidas de adaptación.
Ref.39	*Water governance in Chile: Availability, management and climate change*	Rodrigo Valdés-Pineda, Roberto Pizarro, Pablo García-Chevesich, Juan B. Valdés y otros	2014	Documento fundamental para el marco chileno. Describe disponibilidad, distribución espacial y temporal del agua, institucionalidad, información y cambio climático. Muestra la desigual distribución hídrica del país, con menor disponibilidad desde Santiago al norte.
Ref.40	*Integration of hyperspectral and LiDAR data for mapping small water bodies*	Jiří Prošek, Jiří Vojar, Kateřina Gdulová, Vojtěch Barták, Milič Solský, Duccio Rocchini y Vítězslav Moudrý	2020	Aporta antecedentes sobre monitoreo territorial mediante teledetección e integración de datos hiperespectrales y LiDAR para identificar pequeños cuerpos de agua. Puede servir como referencia secundaria para monitoreo espacial y seguimiento ambiental.
Ref.41	*Wetlands for wastewater treatment and recycling*	Jan Vymazal	2010	Aporta antecedentes sobre humedales construidos como solución basada en la naturaleza para tratamiento y posterior reúso de aguas residuales. Es útil para analizar alternativas de bajo consumo energético, operación simple y aplicación en sistemas descentralizados, especialmente para riego, áreas verdes o recuperación ambiental. Complementa la discusión sobre

				infraestructura verde y reúso en territorios con estrés hídrico.
Ref.42	*Improving mean water lake surface elevation estimates using dense LiDAR measurements from the GEDI satellite mission*	Frappart, F., Minh, D. H. T., Baghdadi, N., Crétaux, J.-F., Fayad, I., & Bergé-Nguyen, M.	2024	Documento metodológico sobre monitoreo hidrológico mediante LiDAR satelital GEDI. Aunque se centra en niveles de agua en lagos, aporta una base útil para incorporar herramientas de teledetección en la gestión del agua. Puede servir como referencia para fortalecer el componente de información, monitoreo y reducción de incertidumbre en sistemas hídricos.
Ref.43	*Feasibility of monitoring floodplain on-farm water storages by integrating airborne and satellite LiDAR altimetry with optical remote sensing*	Peña-Arancibia, J. L., Ticehurst, C. J., Yu, Y., McVicar, T. R., & Marvanek, S	2024	Aporta una metodología para monitorear pequeños almacenamientos de agua mediante sensores ópticos, LiDAR satelital y LiDAR aerotransportado. Es relevante para la tesina porque permite discutir cómo la información territorial y satelital puede apoyar la planificación hídrica, la fiscalización y la gobernanza de infraestructuras distribuidas de almacenamiento o reúso.
Ref.44	*Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework and applications*	Song, X., Zhang, J., Xuan, Y., Ye, M., Xu, C., & Zhan, C.	2015	Revisión sobre análisis de sensibilidad global en modelos hidrológicos. Es útil para fundamentar que los modelos de disponibilidad hídrica, demanda o escenarios de reúso deben considerar incertidumbre, calibración y parámetros críticos. Aporta base metodológica para análisis robustos en contextos de cambio climático y planificación de recursos hídricos.
Ref.45	*A Review on Hydrological Models*	Devi, G. K., Pa, G. B., & Sa, D. G.	2015	Revisión general sobre modelos hidrológicos, incluyendo modelos empíricos, conceptuales y físicos. Sirve como antecedente metodológico para comprender herramientas de simulación de escorrentía, infiltración, disponibilidad hídrica y respuesta de cuencas. Puede complementar el análisis de planificación hídrica y escenarios futuros para Antofagasta.
Ref.46	*Fit for purpose? Building and evaluating a fast, integrated model to explore water policy pathways*	Haasnoot, M., van Beek, E., van Deursen, W., Guillaume, J., Kwakkel, J., & Middelkoop, H.	2014	Aporta un enfoque de planificación adaptativa mediante modelos integrados rápidos para explorar trayectorias de política hídrica bajo incertidumbre climática y socioeconómica. Es relevante para la tesina porque permite analizar el

				reúso no como una medida aislada, sino como parte de una secuencia de decisiones estratégicas frente a escenarios futuros.
Ref.47	*The sustainability of the Italian water sector: An empirical analysis of DEA*	Lombardi, G. V., Stefani, G., Paci, A., Becagli, C., Miliacca, S., Gastaldi, M., Giannetti, B. F., & Almeida, C. M. V.	2019	Estudio empírico sobre eficiencia y sostenibilidad del sector hídrico italiano mediante Análisis Envolvente de Datos —DEA—. Aporta criterios para evaluar desempeño de operadores de agua considerando variables económicas, operativas y ambientales, como pérdidas de agua. Puede complementar el análisis regulatorio y de eficiencia en servicios sanitarios.
Ref.48	*¿Fue eficiente la asignación de recursos en el suministro de agua potable en el departamento de Bolívar – Colombia en el periodo 2007-2008?*	Maza Ávila, F. J., Navarro España, J. L., & Puello Payares, J. G.	2012	Estudio latinoamericano que utiliza DEA para evaluar eficiencia en la asignación de recursos para agua potable a nivel municipal. Es útil para discutir eficiencia del gasto público, desempeño de sistemas de abastecimiento, gestión local y necesidad de indicadores para orientar decisiones de inversión y control.
Ref.49	*Resilience of critical infrastructure to natural hazards: A review focused on drinking water systems*	Quitana, G., Molinos-Senante, M., & Chamorro, A.	2020	Revisión sobre resiliencia de infraestructura crítica, enfocada en sistemas de agua potable. Aporta conceptos como robustez, redundancia, capacidad de adaptación, recuperación y continuidad del servicio. Es relevante para conectar el reúso de AST con resiliencia territorial y seguridad hídrica frente a eventos extremos.
Ref.50	*Meeting multiple mandates: the increasing complexity of water utilities management*	Cabrera Flamini, A., & Schwartz, K.	2025	Analiza la creciente complejidad de las empresas de agua, que deben cumplir simultáneamente mandatos de cobertura universal, viabilidad financiera y sostenibilidad ambiental. Es útil para comprender el rol de las sanitarias en un escenario donde el reúso, la adaptación climática y la economía circular se incorporan como nuevas exigencias de gestión.
Ref.51	*How could wastewater reuse meet national water strategy?*	Zhang, W., Li, Y., Wang, C., Wang, P., Wang, Q., & Wang, D.	2017	Artículo clave para vincular el reúso de aguas residuales con estrategias nacionales de seguridad hídrica. Plantea que la reutilización puede aumentar la oferta urbana, pero requiere estándares de calidad, marco regulatorio obligatorio,

				coordinación institucional, financiamiento y aceptación pública. Es directamente aplicable al enfoque de propuesta regulatoria de la tesina.
Ref.52	*Autonomía y regulación en el sector sanitario chileno*	José Miguel Sánchez C. & Ricardo Sanhueza P.	2000	Documento relevante para comprender el sector sanitario chileno como monopolio natural regulado. Analiza la autonomía del regulador, el proceso tarifario, la discrecionalidad institucional y la necesidad de reglas claras. Aporta fundamentos para discutir el rol de la SISS y los desafíos regulatorios asociados al reúso de AST.
Ref.53	*Estrategia Nacional del Agua y Opciones de Políticas*	Magíster en Gestión del Agua, Universidad Técnica Federico Santa María	2024	Presentación académica que aborda crisis hídrica, gobernanza, derechos de aprovechamiento, desalinización, institucionalidad y alternativas de política pública. Es útil para contextualizar el reúso dentro de un conjunto más amplio de opciones estratégicas, junto con desalación, trasvases, reformas institucionales y fortalecimiento de la gobernanza hídrica.
Ref.54	*Watered-down politics? Inclusive water governance in a changing world*	Gupta, J., Pahl-Wostl, C., & Zondervan, R.	2023	Artículo sobre gobernanza inclusiva del agua, participación efectiva, justicia hídrica y redistribución de poder. Es distinto al documento ya incorporado sobre gobernanza inclusiva en Países Bajos, por lo que conviene agregarlo. Aporta una mirada crítica para evitar que el reúso sea solo una solución técnica sin inclusión real de actores territoriales.

Fuente: *Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica y documental realizada en el marco de la investigación*

A2. Clasificación de antecedentes según utilidad para la investigación

Id.	Documento	Clasificación	Utilidad para la investigación
Ref.01	*Desafíos del Agua para la Región Latinoamericana*	Fundamental	Aporta el marco general sobre seguridad hídrica, cambio climático, gestión del agua y reúso de aguas residuales tratadas. Permite contextualizar el reúso como una nueva fuente hídrica frente a escenarios de escasez.
Ref.02	*Gobernanza desde las cuencas: Institucionalidad para la seguridad hídrica en Chile*	Fundamental	Entrega una base institucional para analizar la gobernanza del agua desde las cuencas. Es clave para vincular el reúso con coordinación territorial, participación y gestión integrada.
Ref.03	*La institucionalidad de la gestión del agua en Chile*	Fundamental	Sirve para comprender la estructura jurídica e institucional del agua en Chile, la fragmentación de competencias y las limitaciones del modelo actual de gestión hídrica.
Ref.04	*Principios del reúso de aguas residuales y regulaciones en Chile y el extranjero*	Fundamental	Aporta conceptos centrales sobre reúso, tipos de uso, niveles de tratamiento y comparación normativa. Es directamente útil para fundamentar la brecha regulatoria chilena.
Ref.05	*Agua desalinizada, ¿solución a la escasez hídrica en la ciudad de Antofagasta, Chile?*	Fundamental	Documento clave para contextualizar territorialmente la Región de Antofagasta, su escasez hídrica, dependencia de nuevas fuentes y presión de actividades productivas.
Ref.06	*Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile*	Fundamental	Permite vincular el reúso con transición hídrica, economía circular, eficiencia, nuevas fuentes y seguridad hídrica nacional.
Ref.07	*Catastro de la Reutilización de AST en el Sector Sanitario*	Fundamental	Es uno de los documentos centrales de la tesina. Entrega antecedentes técnicos, legales, catastrales y de oportunidades para proyectos de reutilización de AST en Chile.
Ref.08	*ESTUDIO_212 calidad de efluentes SISS*	Específica	Aporta antecedentes técnicos sobre calidad de efluentes de PTAS y parámetros de control. Es útil para definir variables técnicas mínimas para evaluar reúso.
Ref.09	*Informe de Gestión del Sector Sanitario 2024*	Fundamental	Entrega cifras actualizadas del sector sanitario, tratamiento de aguas servidas, disposición de efluentes y reúso directo. Sirve para actualizar el diagnóstico nacional.

Ref.10	*Evaluación de viabilidad técnico-normativa del sistema de saneamiento de aguas servidas "Los Almendros"*	Específica	Aporta un caso aplicado sobre saneamiento, control de nitrógeno, brechas normativas y calidad de efluente. Es útil para analizar condiciones técnicas previas al reúso.
Ref.11	*Evaluación de la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos de Chile 2012-2025*	Fundamental	Entrega una metodología para evaluar políticas hídricas mediante revisión documental y consulta a expertos. Sirve como referencia para estructurar el análisis metodológico.
Ref.12	*Evaluación del potencial de generación de hidrógeno a partir de aguas residuales de la Región de Valparaíso*	Específica	Aporta una metodología aplicada para evaluar usos productivos de AST, considerando oferta de agua, localización de PTAS, proyección de disponibilidad y uso energético.
Ref.13	*Rol de la SISS en la producción de agua desalinizada para consumo humano*	Fundamental	Permite comparar los desafíos regulatorios de la desalación con los desafíos del reúso de AST, especialmente respecto del rol fiscalizador y regulador de la SISS.
Ref.14	*Gobernanza del agua y cambio climático: fortalezas y debilidades del actual sistema de gestión del agua en Chile*	Fundamental	Refuerza el marco de gobernanza, cambio climático e institucionalidad. Es útil para argumentar la necesidad de coordinación intersectorial.
Ref.15	*Propuesta para alcanzar la seguridad hídrica*	Fundamental	Aporta una mirada actual sobre desalación, reúso y fuentes no convencionales. Sirve para conectar la tesina con propuestas recientes de seguridad hídrica.
Ref.16	*Estudio de caso sobre la aceleración del país para el logro del ODS 6: Singapur*	Específica	Caso internacional de referencia sobre reúso, planificación, gobernanza y diversificación de fuentes hídricas. Permite comparar el modelo chileno con una experiencia avanzada.
Ref.17	*Tratamiento de aguas residuales: calidad, operación y fiscalización*	Específica	Material técnico útil para comprender procesos de tratamiento, control operacional, fiscalización, lodos, desinfección y calidad de efluentes.

Ref.18	*2012 Guidelines for Water Reuse*	Fundamental	Guía internacional clave para proyectos de reúso. Aporta enfoque “fit for purpose”, criterios sanitarios, monitoreo, categorías de uso y planificación.
Ref.19	*Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú*	Específica	Aporta un caso latinoamericano comparado sobre regulación, tratamiento, reúso, ODS 6 y riesgos sanitarios. Es útil para comparar brechas normativas regionales.
Ref.20	*Reúso de aguas servidas tratadas: desafíos en la regulación para un uso eficiente del recurso hídrico*	Fundamental	Documento jurídico clave para Chile. Analiza propiedad, disposición, conflictos normativos, rol de SISS, Contraloría y tribunales. Es central para la dimensión regulatoria.
Ref.21	*Reuse of treated municipal wastewater in productive activities in Brazil’s semi-arid regions*	Específica	Aporta una experiencia latinoamericana en zonas semiáridas. Es útil para evaluar reúso productivo, análisis multicriterio, tecnología y participación social.
Ref.22	*Small wastewater treatment plants in Austria*	Específica	Útil para analizar plantas pequeñas, soluciones descentralizadas, tecnologías de tratamiento y capacitación de operadores. Aporta al análisis de gestión local.
Ref.23	*Water reclamation and sludge recycling scenarios for sustainable resource management in Taiwan*	Específica	Aporta enfoque de economía circular, reúso de agua, valorización de lodos, energía y análisis de ciclo de vida. Complementa el análisis ambiental del reúso.
Ref.24	*Pilot-scale polluted river water treatment using membrane photocatalytic reactor*	Complementaria	Aporta antecedentes sobre tratamiento avanzado mediante reactor fotocatalítico de membrana. Es útil como tecnología complementaria, pero no central para la tesina.
Ref.25	*Public acceptability of treated wastewater reuse in Saudi Arabia*	Específica	Aporta la dimensión social del reúso, aceptabilidad pública, confianza, educación y percepción de riesgo. Es útil para la gobernanza y legitimidad social.
Ref.26	*Conventional wastewater technologies vs. algal wastewater technologies*	Específica	Sirve para comparar tecnologías convencionales y algales orientadas a reúso agrícola microbiológicamente seguro. Aporta criterios sanitarios y energéticos.

Ref.27	*Risk and sustainability assessment framework for decision support in water scarcity – water reuse situations*	Fundamental	Documento metodológico central. Permite evaluar el reúso integrando riesgo de escasez hídrica y sostenibilidad social, ambiental y económica.
Ref.28	*Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent*	Específica	Aporta antecedentes sobre humedales construidos como tecnología de bajo costo y bajo consumo energético para tratamiento y reúso.
Ref.29	*Ecological ditch system for nutrient removal of rural domestic sewage*	Complementaria	Entrega antecedentes técnicos sobre zanjas ecológicas para remoción de nutrientes en aguas residuales rurales. Es útil como referencia secundaria de tratamiento natural.
Ref.30	*Evaluating the European market potential for small modular wastewater treatment systems*	Específica	Aporta criterios sobre sistemas modulares, descentralización, densidad territorial e infraestructura flexible. Útil para discutir alternativas al modelo centralizado.
Ref.31	*Stakeholder analysis for effective implementation of a water management system*	Fundamental	Aporta una metodología de análisis de actores mediante matriz poder-interés. Es muy útil para estructurar la dimensión institucional y de gobernanza del reúso.
Ref.32	*Governance towards coordination for water resources management*	Fundamental	Documento clave para analizar coordinación vertical, horizontal y modos de gobernanza. Es directamente aplicable al diseño institucional del reúso.
Ref.33	*Cyber-physical systems in water management and governance*	Complementaria	Aporta una mirada sobre digitalización, sensores, IA, monitoreo y trazabilidad. Complementa la discusión sobre control y transparencia del agua reutilizada.
Ref.34	*Water accounting: A global review and indicators of best practice for better water governance*	Fundamental	Relevante para justificar la necesidad de datos confiables, cuentas de agua, balances, oferta de AST, demanda y trazabilidad para la gobernanza.

Ref.35	*Watered-down politics? Inclusive water governance in the Netherlands*	Específica	Aporta una discusión crítica sobre participación e inclusión efectiva. Útil para evitar una visión meramente formal de la gobernanza del reúso.
Ref.36	*The diagnostic water governance tool*	Fundamental	Entrega una herramienta metodológica para diagnosticar brechas de gobernanza y coordinación intersectorial. Muy útil para construir una matriz institucional.
Ref.37	*Assessment of the contribution of water policies to sustainable water resources management under climate change scenarios*	Específica	Aporta metodología para evaluar políticas hídricas bajo escenarios climáticos. Útil para vincular reúso, adaptación y sostenibilidad de largo plazo.
Ref.38	*Adapting to climate change impacts on water resources in England*	Complementaria	Aporta experiencia comparada sobre planificación de recursos hídricos a largo plazo. Sirve para enriquecer la discusión sobre adaptación y oferta-demanda.
Ref.39	*Water governance in Chile: Availability, management and climate change*	Fundamental	Documento clave para el caso chileno. Aporta antecedentes sobre disponibilidad hídrica, cambio climático, derechos de agua y fragmentación institucional.
Ref.40	*Integration of hyperspectral and LiDAR data for mapping small water bodies*	Complementaria	Útil como referencia secundaria para monitoreo territorial y seguimiento ambiental mediante sensores remotos.
Ref.41	*Wetlands for wastewater treatment and recycling*	Específica	Aporta antecedentes sobre humedales construidos, infraestructura verde, remoción de nutrientes y reúso no potable. Es útil para evaluar soluciones naturales.
Ref.42	*Improving mean water lake surface elevation estimates using dense LiDAR measurements from GEDI*	Complementaria	Aporta metodología de monitoreo hidrológico satelital. Sirve para fortalecer la dimensión de información y observación territorial.
Ref.43	*Feasibility of monitoring floodplain on-farm water storages by integrating LiDAR and optical remote sensing*	Complementaria	Útil para discutir monitoreo de almacenamientos de agua e infraestructura hídrica distribuida mediante sensores remotos.

Ref.44	*Global sensitivity analysis in hydrological modeling*	Complementaria	Aporta fundamentos sobre incertidumbre, calibración y sensibilidad de modelos hidrológicos. Puede apoyar análisis futuros de escenarios.
Ref.45	*A Review on Hydrological Models*	Complementaria	Revisión metodológica sobre modelos hidrológicos. Útil como base secundaria para comprender herramientas de simulación de disponibilidad hídrica.
Ref.46	*Fit for purpose? Building and evaluating a fast, integrated model to explore water policy pathways*	Específica	Aporta planificación adaptativa y evaluación de trayectorias de política hídrica. Útil para analizar el reúso como parte de una estrategia progresiva.
Ref.47	*The sustainability of the Italian water sector: An empirical analysis of DEA*	Complementaria	Aporta metodología de eficiencia y sostenibilidad de operadores mediante DEA. Complementa el análisis regulatorio y de desempeño del sector sanitario.
Ref.48	*¿Fue eficiente la asignación de recursos en el suministro de agua potable en Bolívar, Colombia?*	Complementaria	Caso latinoamericano sobre eficiencia del gasto y gestión municipal del agua potable. Útil como referencia de evaluación de desempeño.
Ref.49	*Resilience of critical infrastructure to natural hazards*	Específica	Aporta marco sobre resiliencia de infraestructura crítica de agua potable. Útil para conectar el reúso con continuidad, seguridad hídrica y adaptación a riesgos.
Ref.50	*Meeting multiple mandates: the increasing complexity of water utilities management*	Específica	Aporta una mirada actual sobre las nuevas responsabilidades de las empresas sanitarias: cobertura, viabilidad financiera y sostenibilidad ambiental.
Ref.51	*How could wastewater reuse meet national water strategy?*	Fundamental	Documento muy relevante para vincular directamente el reúso con estrategias nacionales de seguridad hídrica, regulación, coordinación institucional y aceptación pública.
Ref.52	*Autonomía y regulación en el sector sanitario chileno*	Fundamental	Aporta fundamentos sobre regulación sanitaria, monopolio natural, autonomía del regulador y proceso tarifario. Es clave para discutir el rol institucional de la SISS.
Ref.53	*Estrategia Nacional del Agua y Opciones de Políticas*	Fundamental	Presentación útil para contextualizar crisis hídrica, derechos de agua, institucionalidad, desalinización, reúso y opciones de política pública.

Ref.54	*Watered-down politics? Inclusive water governance in a changing world*	Específica	Aporta una mirada crítica sobre inclusión, poder, justicia hídrica y participación efectiva. Es útil para fortalecer la dimensión política de la gobernanza del reúso.

Fuente: *Elaboración propia a partir de la revisión y clasificación de los antecedentes bibliográficos y documentales utilizados en la investigación.*

A3. Síntesis por tipo de lectura

Clasificación	Documentos	Función dentro de la tesina
Fundamentales	Ref.01, Ref.02, Ref.03, Ref.04, Ref.05, Ref.06, Ref.07, Ref.09, Ref.11, Ref.13, Ref.14, Ref.15, Ref.18, Ref.20, Ref.27, Ref.31, Ref.32, Ref.34, Ref.36, Ref.39, Ref.51, Ref.52, Ref.53	Construyen la base principal del marco teórico, normativo, institucional y metodológico.
Específicas	Ref.08, Ref.10, Ref.12, Ref.16, Ref.17, Ref.19, Ref.21, Ref.22, Ref.23, Ref.25, Ref.26, Ref.28, Ref.30, Ref.35, Ref.37, Ref.41, Ref.46, Ref.49, Ref.50, Ref.54	Profundizan aspectos concretos del reúso: calidad, tecnologías, experiencias comparadas, riesgos, aceptabilidad, resiliencia y usos productivos.
Complementarias	Ref.24, Ref.29, Ref.33, Ref.38, Ref.40, Ref.42, Ref.43, Ref.44, Ref.45, Ref.47, Ref.48	Entregan herramientas, métodos o enfoques secundarios que enriquecen la discusión, pero no son el núcleo del estudio.

Fuente: Elaboración propia

A4. Matriz de antecedentes por dimensión de análisis

Id.	Documento	Dimensión técnica	Dimensión normativa	Dimensión institucional / gobernanza
Ref.01	*Desafíos del Agua para la Región Latinoamericana*	Aporta antecedentes sobre escasez hídrica, seguridad hídrica, reúso de aguas residuales tratadas y nuevas fuentes de agua.	Entrega una mirada general sobre políticas hídricas y necesidad de marcos de gestión adecuados.	Refuerza la gestión integrada del agua, coordinación por cuencas y necesidad de enfoques colaborativos.
Ref.02	*Gobernanza desde las cuencas*	Vincula disponibilidad hídrica, cambio climático y presión sobre fuentes convencionales.	Indirectamente permite identificar brechas institucionales que requieren ajustes normativos.	Documento central para gobernanza de cuencas, coordinación multinivel, participación y seguridad hídrica.

Ref.03	*La institucionalidad de la gestión del agua en Chile*	Contextualiza la disponibilidad y uso del recurso hídrico en Chile.	Aporta base jurídica sobre agua como bien nacional de uso público, derechos de aprovechamiento y Código de Aguas.	Identifica fragmentación institucional, actores públicos y privados, y limitaciones del modelo chileno de gestión.
Ref.04	*Principios del reúso de aguas residuales y regulaciones en Chile y el extranjero*	Describe usos posibles del reúso, niveles de tratamiento y exigencias de calidad según destino.	Señala ausencia de una regulación chilena integral para reúso de aguas residuales tratadas a gran escala.	Permite comparar modelos regulatorios internacionales y el rol de la institucionalidad pública.
Ref.05	*Agua desalinizada, ¿solución a la escasez hídrica en Antofagasta?*	Aporta antecedentes territoriales sobre aridez, disponibilidad hídrica, desalación y presión minera en Antofagasta.	Indirectamente permite analizar cómo nuevas fuentes se insertan en el marco de gestión existente.	Refuerza la necesidad de gestión integrada, planificación territorial y diversificación de fuentes en Antofagasta.
Ref.06	*Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile*	Relaciona escasez, eficiencia hídrica, nuevas fuentes y adaptación al cambio climático.	Propone lineamientos estratégicos que pueden orientar políticas públicas y regulación.	Entrega enfoque de transición hídrica, coordinación institucional, economía circular y gestión colaborativa.
Ref.07	*Catastro de la Reutilización de AST en el Sector Sanitario*	Documento clave sobre disponibilidad de AST, sistemas de reutilización, tecnologías, caudales, usuarios y oportunidades de reúso.	Analiza factibilidad legal, normativa aplicable, estándares y protocolos de información para empresas sanitarias.	Identifica actores, usuarios directos e indirectos, rol de sanitarias y oportunidades en zonas prioritarias por escasez.
Ref.08	*ESTUDIO_212 calidad de efluentes SISS*	Aporta parámetros de calidad de efluentes: pH, DBO5, SST, fósforo, nitrógeno, aceites, grasas y coliformes.	Permite relacionar calidad del efluente con cumplimiento normativo y estándares de descarga.	Apoya el rol fiscalizador y de control técnico de la SISS respecto del desempeño de PTAS.
Ref.09	*Informe de Gestión del Sector Sanitario 2024*	Entrega cifras actualizadas sobre tratamiento de aguas servidas, disposición de efluentes y reúso directo.	Permite vincular el estado del sector con exigencias normativas, fiscalización y cumplimiento.	Aporta visión institucional actual del sector sanitario, concesionarias, fiscalización y desafíos de gestión.
Ref.10	*Evaluación técnico-normativa del sistema "Los Almendros"*	Aporta antecedentes sobre desempeño de PTAS, remoción de nitrógeno, calidad de efluente, lodos y riesgos ambientales.	Identifica brechas sanitarias, ambientales y municipales en sistemas de saneamiento.	Refuerza la necesidad de coordinación municipal, sanitaria y ambiental para evitar pasivos ambientales y habilitar reúso.

Ref.11	*Evaluación de la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025*	Aporta contexto sobre gestión del recurso y medidas para enfrentar escasez.	Permite evaluar avance de políticas públicas hídricas y planificación estratégica nacional.	Aporta metodología de evaluación de políticas mediante actores expertos y seguimiento de implementación.
Ref.12	*Hidrógeno a partir de aguas residuales de Valparaíso*	Aporta metodología para evaluar oferta de AST, localización de PTAS, proyección de suministro y usos productivos.	Indirectamente permite reconocer restricciones para uso de aguas residuales en nuevos procesos.	Vincula sector sanitario, energía, economía circular y planificación territorial para nuevos usos del agua tratada.
Ref.13	*Rol de la SISS en la producción de agua desalinizada*	Permite comparar nuevas fuentes hídricas, especialmente desalación, con el reúso de AST.	Aporta análisis del rol regulador, fiscalizador, autorizador y sancionatorio de la SISS.	Refuerza el papel institucional de la SISS frente a nuevas fuentes y necesidad de coordinación pública.
Ref.14	*Gobernanza del agua y cambio climático*	Relaciona disponibilidad hídrica, cambio climático y necesidad de gestión integrada.	Permite identificar debilidades del sistema chileno que pueden requerir ajustes normativos.	Aporta análisis de fortalezas y debilidades de la gobernanza del agua en Chile.
Ref.15	*Propuesta para alcanzar la seguridad hídrica*	Aporta antecedentes sobre fuentes no convencionales, desalación y reúso.	Propone medidas legislativas e institucionales para impulsar proyectos de agua no convencional.	Refuerza la necesidad de planificación, inversión, permisos y coordinación para seguridad hídrica.
Ref.16	*Caso Singapur ODS 6*	Aporta experiencia técnica en reúso avanzado, NEWater, desalación y diversificación de fuentes.	Permite comparar marcos de planificación y estándares de seguridad hídrica.	Caso internacional de gobernanza, planificación de largo plazo, educación, datos e innovación.
Ref.17	*Tratamiento de aguas residuales: calidad, operación y fiscalización*	Aporta base técnico-operacional sobre tratamiento, desinfección, lodos, olores y calidad de efluentes.	Relaciona operación de PTAS con normativa de efluentes y fiscalización.	Refuerza capacidades institucionales de fiscalización, operación y control técnico.
Ref.18	*2012 Guidelines for Water Reuse*	Aporta criterios técnicos de planificación, calidad, monitoreo, almacenamiento, usos y enfoque “fit for purpose”.	Define componentes de un marco regulatorio de reúso: permisos, definiciones, alcance, prohibiciones y exigencias.	Destaca coordinación entre agencias, participación de usuarios, inventarios de reúso y planificación integrada.
Ref.19	*Los desafíos de la reutilización de aguas residuales en Perú*	Aporta experiencia latinoamericana sobre tratamiento, reúso, riesgos sanitarios y usos no potables.	Analiza régimen jurídico peruano para tratamiento, vertimiento y reúso de aguas residuales.	Refuerza coordinación institucional, financiamiento, OCDE, ODS 6 y gobernanza del saneamiento.

Ref.20	*Reúso de aguas servidas tratadas: desafíos en la regulación*	Aporta fundamento del reúso como fuente alternativa frente a escasez.	Documento clave sobre propiedad de AST, derechos, concesiones, rol de SISS, Contraloría y tribunales.	Identifica conflictos entre sanitarias, usuarios y Estado, y necesidad de certeza jurídica.
Ref.21	*Reuse of treated municipal wastewater in Brazil's semi-arid regions*	Aporta análisis multicriterio para seleccionar tecnologías de tratamiento y usos productivos en zonas semiáridas.	Indirectamente entrega criterios de calidad y seguridad para reúso productivo.	Destaca participación local, aceptación social y adaptación de soluciones al territorio.
Ref.22	*Small wastewater treatment plants in Austria*	Aporta tecnologías para pequeñas PTAR: lodos activados, humedales y reactores secuenciales.	Destaca estándares de diseño que simplifican permisos y aseguran operación adecuada.	Resalta capacitación de operadores y gobernanza local del saneamiento descentralizado.
Ref.23	*Water reclamation and sludge recycling in Taiwan*	Aporta economía circular, recuperación de agua, reúso agrícola, valorización de lodos y energía.	Indirectamente permite discutir estándares para manejo de lodos y efluentes.	Refuerza gestión sostenible de recursos en PTAS y toma de decisiones basada en análisis de ciclo de vida.
Ref.24	*Membrane photocatalytic reactor ZnO-kaolin*	Aporta tratamiento avanzado para remoción de DBO, DQO, turbidez y nitrógeno amoniacal.	Puede servir como referencia para estándares de calidad más exigentes.	Complementa la discusión sobre incorporación de innovación tecnológica en sistemas de tratamiento.
Ref.25	*Public acceptability of treated wastewater reuse in Saudi Arabia*	Aborda riesgos percibidos y requisitos de seguridad para reúso.	Indirectamente refuerza la necesidad de normas claras para generar confianza.	Documento clave para aceptabilidad social, educación, legitimidad y confianza pública en el reúso.
Ref.26	*Conventional vs. algal wastewater technologies*	Compara tecnologías convencionales y algales para reúso agrícola microbiológicamente seguro.	Aporta criterios para incorporar riesgos microbiológicos, ARG y subproductos de desinfección.	Permite discutir tecnologías sostenibles y su aceptación dentro de esquemas descentralizados.
Ref.27	*Risk and sustainability assessment framework*	Integra riesgo de escasez, vulnerabilidad, exposición y sostenibilidad del reúso.	Permite orientar evaluación regulatoria basada en riesgo y sostenibilidad.	Aporta marco de toma de decisiones para gobernanza adaptativa y evaluación ex ante/ex post.
Ref.28	*Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling*	Aporta humedales construidos, remoción de DBO, SST, nutrientes y reúso no potable.	Puede relacionarse con estándares de calidad para riego y tratamiento natural.	Refuerza soluciones basadas en la naturaleza y gestión descentralizada.

Ref.29	*Ecological ditch system for nutrient removal*	Aporta antecedentes sobre remoción de nitrógeno y fósforo en aguas residuales rurales mediante zanjas ecológicas.	Indirectamente permite discutir calidad requerida para reúso agrícola o ambiental.	Releva gestión local, operación, mantención y adaptación de soluciones al territorio.
Ref.30	*Small modular wastewater treatment systems*	Aporta sistemas modulares, descentralización, densidad territorial e infraestructura flexible.	Indirectamente permite discutir requerimientos regulatorios para sistemas descentralizados.	Refuerza transición sociotécnica, planificación geoespacial y modelos híbridos de gestión.
Ref.31	*Stakeholder analysis – South Korea*	No aporta principalmente tecnología, pero permite identificar usos y presiones sobre aguas subterráneas.	Analiza implementación de instrumentos económicos y limitaciones normativas.	Documento clave para matriz poder-interés, actores, oposición, incentivos y educación ambiental.
Ref.32	*Governance towards coordination for water resources management*	Relaciona gestión de recursos hídricos con coordinación entre sectores.	Permite analizar cómo instrumentos regulatorios interactúan con modos de gobernanza.	Aporta coordinación vertical, horizontal, jerarquía, mercado, redes y articulación intersectorial.
Ref.33	*Cyber-physical systems in water management*	Aporta monitoreo, sensores, IA, gemelos digitales, trazabilidad y control operacional.	Indirectamente permite discutir requisitos de datos, seguridad y control en proyectos de reúso.	Advierte que la tecnología debe integrarse a sistemas socioecológicos y no sustituye gobernanza efectiva.
Ref.34	*Water accounting*	Aporta balances hídricos, oferta, demanda, activos hídricos, calidad y cuentas físicas/monetarias.	Permite fundamentar necesidad de información oficial para regulación y planificación.	Documento clave para gobernanza basada en datos, coordinación interagencial y trazabilidad.
Ref.35	*Watered-down politics? Inclusive water governance in the Netherlands*	No aporta antecedentes técnicos directos.	Indirectamente cuestiona diseños normativos participativos sin incidencia real.	Aporta enfoque crítico sobre participación efectiva, poder, inclusión y toma de decisiones.
Ref.36	*Diagnostic Water Governance Tool*	No es técnico-operacional, pero permite diagnosticar condiciones de gestión del sistema hídrico.	Relaciona brechas institucionales con instrumentos de política pública.	Documento metodológico central para evaluar coordinación intersectorial, cooperación y brechas de gobernanza.
Ref.37	*Water policies under climate change scenarios*	Aporta modelación hidrológica, escenarios climáticos, confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad.	Permite evaluar políticas hídricas bajo criterios de sostenibilidad.	Refuerza planificación adaptativa, evaluación de políticas y gestión de largo plazo.

Ref.38	*WRMP England*	Aporta balance oferta-demanda, impactos del cambio climático, presión de demanda y adaptación.	Permite comparar instrumentos formales de planificación hídrica regulada.	Refuerza rol de empresas de agua, planificación de largo plazo y toma de decisiones bajo incertidumbre.
Ref.39	*Water governance in Chile*	Aporta disponibilidad, distribución espacial del agua y efectos del cambio climático en Chile.	Analiza Código de Aguas, derechos, asignación y priorización de usos.	Documento clave sobre fragmentación institucional, conflictos y debilidades de gobernanza chilena.
Ref.40	*Hyperspectral and LiDAR mapping small water bodies*	Aporta monitoreo territorial de cuerpos de agua mediante sensores remotos.	Indirectamente puede apoyar control y fiscalización ambiental.	Refuerza necesidad de información espacial objetiva para planificación y seguimiento.
Ref.41	*Wetlands for wastewater treatment and recycling*	Aporta humedales construidos, tratamiento natural, infraestructura verde y reúso.	Indirectamente permite discutir estándares para usos no potables.	Refuerza modelos descentralizados y participación local en gestión de soluciones naturales.
Ref.42	*GEDI satellite mission – lake surface elevation*	Aporta monitoreo hidrológico satelital y estimación de niveles de agua.	Indirectamente apoya fiscalización y control mediante información verificable.	Refuerza gobernanza basada en evidencia, datos y monitoreo continuo.
Ref.43	*Monitoring on-farm water storages with LiDAR and remote sensing*	Aporta monitoreo de almacenamiento de agua, superficie, volumen y evaporación.	Puede apoyar control del uso de agua e infraestructura distribuida.	Fortalece planificación regional, gestión de cuencas y toma de decisiones basada en datos.
Ref.44	*Global sensitivity analysis in hydrological modeling*	Aporta métodos para calibración, incertidumbre y análisis de sensibilidad en modelos hidrológicos.	Indirectamente permite mejorar sustento técnico de políticas y planificación.	Refuerza toma de decisiones basada en modelos robustos y evidencia científica.
Ref.45	*A Review on Hydrological Models*	Aporta revisión de modelos lluvia-escorrentía, empíricos, conceptuales y físicos.	Indirectamente apoya evaluación técnica de disponibilidad hídrica.	Permite fundamentar planificación de recursos hídricos y gestión integrada.
Ref.46	*Fit for purpose? Water policy pathways*	Aporta modelos integrados, escenarios de sequía, inundación, intrusión salina y adaptación.	Permite evaluar políticas bajo incertidumbre y planificación adaptativa.	Refuerza gobernanza flexible, trayectorias de decisión y estrategias progresivas.
Ref.47	*Sustainability of the Italian water sector – DEA*	Aporta indicadores de eficiencia, pérdidas de agua, desempeño operativo y sostenibilidad.	Permite comparar modelos regulatorios y desempeño de empresas de agua.	Refuerza análisis de operadores, regulación económica y eficiencia sectorial.

Ref.48	*Eficiencia en suministro de agua potable en Bolívar, Colombia*	Aporta metodología DEA para eficiencia, cobertura, continuidad e inversión.	Indirectamente se vincula con control del gasto público y desempeño de servicios.	Refuerza gestión municipal, evaluación de desempeño y rol de entes de control.
Ref.49	*Resilience of critical infrastructure to natural hazards*	Aporta resiliencia, continuidad del servicio, robustez, redundancia y recuperación.	Indirectamente permite vincular estándares de continuidad y seguridad.	Refuerza coordinación institucional, gestión del riesgo y planificación de infraestructura crítica.
Ref.50	*Meeting multiple mandates*	Aporta análisis de operaciones de empresas de agua frente a cobertura, costos y sostenibilidad.	Permite discutir nuevas exigencias regulatorias a operadores sanitarios.	Refuerza rol ampliado de sanitarias: servicio, viabilidad financiera, sostenibilidad y adaptación climática.
Ref.51	*How could wastewater reuse meet national water strategy?*	Aporta reúso como fuente de suministro urbano y necesidad de estándares de calidad.	Documento clave sobre marco regulatorio obligatorio, calidad del agua regenerada y políticas de reúso.	Refuerza coordinación gubernamental, financiamiento, aceptación pública y planificación nacional del reúso.
Ref.52	*Autonomía y regulación en el sector sanitario chileno*	Contextualiza servicios sanitarios como monopolio natural.	Aporta fundamentos sobre regulación tarifaria, autonomía del regulador y discrecionalidad institucional.	Documento clave para analizar autonomía de la SISS, presiones políticas y gobernanza regulatoria.
Ref.53	*Estrategia Nacional del Agua y Opciones de Políticas*	Aporta contexto sobre crisis hídrica, alternativas de oferta, desalación y reúso.	Permite discutir opciones de política pública, derechos de agua y reformas institucionales.	Refuerza fragmentación institucional y necesidad de nuevas entidades o coordinación reforzada.
Ref.54	*Watered-down politics? Inclusive water governance in a changing world*	No aporta antecedentes técnicos directos sobre tratamiento, pero sí sobre condiciones sociales del reúso.	Indirectamente orienta criterios para diseñar políticas inclusivas y no meramente formales.	Documento clave para analizar inclusión sustantiva, justicia hídrica, poder, participación real y gobernanza transformadora.

Fuente: Elaboración propia

A5. Análisis de coincidencias y patrones

- **La escasez Hídrica como condición estructural de referencia**

La revisión de antecedentes permitió reconocer la escasez hídrica como una condición estructural que afecta la planificación y gestión del recurso en territorios áridos como la Región de Antofagasta. Para efectos de la aplicación metodológica, este antecedente se incorpora como una condición de contexto que justifica la evaluación de fuentes no convencionales y la necesidad de analizar alternativas de reúso bajo criterios técnicos, regulatorios y de gobernanza.

Los antecedentes relativos a infraestructura hídrica no convencional, capacidad de desalación, cartera de proyectos e inversiones fueron utilizados únicamente como referencia para contextualizar la presión sobre las fuentes convencionales y la incorporación de nuevas fuentes. El detalle de estos antecedentes se presenta en la siguiente tabla.

Infraestructura hídrica no convencional como respuesta a la escasez hídrica en Chile

Indicador informado en el documento	Dato	Relación con la escasez hídrica
Plantas desaladoras industriales existentes en Chile	24 plantas	Aportan nuevas fuentes de agua independientes de las precipitaciones.
Capacidad actual de producción de agua desalinizada	Más de 10.500 l/s	Permite complementar la oferta hídrica y reducir presión sobre fuentes continentales.
Proyectos de desalación, transporte o reúso en ingeniería o construcción	41 proyectos	Refleja una cartera de inversión orientada a enfrentar brechas futuras de agua.
Capacidad adicional proyectada por estos proyectos	45.239 l/s	Representa un aumento relevante de disponibilidad hídrica potencial.
Inversión estimada asociada	USD 22.159 millones	Muestra la magnitud económica requerida para avanzar hacia seguridad hídrica.
Proyectos asociados directamente a minería	15 proyectos	Responden a la alta demanda hídrica productiva en zonas áridas.
Proyectos asociados a hidrógeno o amoníaco verde	12 proyectos	Vinculan seguridad hídrica con transición energética e industrial.
Proyectos multipropósito	11 proyectos	Permiten abastecer distintos usos: minería, consumo humano, agricultura u otros.
Proyectos vinculados al consumo humano	3 proyectos	Refuerzan la seguridad de abastecimiento para población y servicios sanitarios.
Proyectos en construcción próximos a operar	7 proyectos	Agregarían capacidad en el corto plazo.
Capacidad de los proyectos próximos a operar	Más de 8.014 l/s	Aumentan la oferta disponible para enfrentar déficit hídrico regional.

Fuente: Elaboración propia en base a ACADES, Propuesta para alcanzar la seguridad hídrica, abril 2025.

- **El reúso de Aguas Servidas Tratadas (AST) se repite como fuente alternativa y estratégica**

Otra idea transversal es que las aguas servidas tratadas (AST) deben dejar de ser consideradas únicamente como un residuo o efluente a disponer, para ser entendidas como una fuente alternativa de agua. Esta visión aparece de forma clara en documentos como el catastro de la Reutilización de AST en el Sector Sanitario, las 2012 Guidelines for Water Reuse, el artículo de Ballivian sobre regulación del reúso en Chile, el artículo sobre Perú, el caso de Brasil en regiones semiáridas, el caso de Chila sobre estrategia nacional del agua y los documentos sobre economía circular en plantas de tratamiento.

La literatura coincide en que el reúso permite reducir la presión sobre fuentes naturales, diversificar la matriz hídrica, mejorar la seguridad de suministro y generar beneficios ambientales al disminuir las descargas a cuerpos receptores. También se repite la idea de que su potencial es especialmente relevante en zonas con estrés hídrico, donde cada volumen de agua es tratado puede adquirir valor estratégico. En la investigación, esta coincidencia permite sostener que el reúso de AST en Antofagasta debe evaluarse como una alternativa complementaria a la desalinización, al uso de fuentes continentales y a otras soluciones de oferta. No reemplaza necesariamente a estas fuentes, pero puede integrarse como parte de una estrategia de economía circular y seguridad hídrica regional.

- **La calidad del efluente es una condición habilitante para cualquier proyecto de reúso**

Una tercera idea que se repite con fuerza es que el reúso depende directamente de la calidad del agua tratada. Los documentos técnicos revisados insisten en que no basta con contar con volumen disponible de aguas servidas tratadas, también es necesario verificar parámetros físicos, químicos y microbiológicos que permitan definir usos seguros. Esta idea aparece en el ESTUDIO_212 calidad de efluentes SISS, en las 2012 Guidelines for Water Reuse, en la NCh 3456/2 citada en documentos SISS, en la memoria sobre el sistema “Los Almendros”, en los artículos sobre tecnologías algales, humedales construidos, zanjas ecológicas, tratamiento avanzado con membranas y reúso agrícola. Los parámetros más recurrentes son DBO5, sólidos suspendidos totales, turbiedad, coliformes, nitrógeno, fósforo, pH, cloro residual, aceites y grasas, además de contaminantes emergentes en algunos estudios.

La idea central es que el “reúso debe ser apto para el propósito”, es decir la calidad debe depender del uso final: riego agrícola, áreas verdes, uso industrial, recarga, uso ambiental u otros usos no potables. Para la investigación esto implica que la dimensión técnica debe evaluar no solo la existencia de PTAS o caudales disponibles, sino también la calidad real del efluente y los tratamientos adicionales que podrían requerirse.

Los antecedentes revisados muestran que la calidad de los efluentes tratados en el país es heterogénea. Algunas plantas presentan resultados favorables, con baja carga orgánica, bajos solidos suspendidos y reducida presencia microbiológica, lo que podría facilitar su

evaluación como fuente alternativa para reúso. Sin embargo, también se observan casos con coliformes fecales elevados y bajos niveles de cloro residual, lo que evidencia que el reúso no puede plantearse de manera uniforme, sino que requiere estándares diferenciados según uso final, nivel de explotación, tecnología de tratamiento y capacidad de control operacional.

- **Existe una brecha regulatoria específica sobre reúso de AST**

Una de las coincidencias más relevantes para la dimensión normativa es la falta de una regulación integral y específica para el reúso de aguas servidas tratadas. Esta idea aparece en el artículo de Ballivian, en el documento de Baeza, en el catastro SISS, en los antecedentes sobre el rol de la SISS en nuevas fuentes, el análisis comparado con Perú, en las guías internacionales y en los documentos sobre estrategia nacional del agua.

La literatura muestra que Chile cuenta con normas de emisión, normas sanitarias, normas de calidad para ciertos usos y regulaciones relacionadas con aguas grises o descargas, pero no dispone de un marco integral que regule de manera completa el reúso de AST a gran escala. Esto genera incertidumbres sobre propiedad de efluente tratado, responsabilidades de los actores, estándares por uso, permisos, fiscalización, tarifas, incentivos, distribución de costos y mecanismos de control. Esta idea permite formular una brecha clara: el reúso de AST posee potencial técnico, pero enfrenta limitaciones normativas e institucionales que dificultan su implementación sistemática. Por ello, la propuesta metodológica no debe limitarse a evaluar caudales o tecnologías, sino también los vacíos regulatorios que condicionan la viabilidad del reúso.

- **La coordinación institucional es indispensable para implementar el reúso**

La otra idea transversal es que el reúso no puede implementarse eficazmente si cada institución actúa de manera aislada. Los documentos sobre gobernanza desde las cuencas, análisis de actores, coordinación intersectorial, herramienta diagnostica de gobernanza, contabilidad del agua, gobernanza inclusiva y planificación hídrica coinciden en que los problemas del agua requieren coordinación vertical y horizontal.

La coordinación vertical se refiere a la articulación entre niveles nacional, regional y local. La coordinación horizontal se relaciona con la interacción entre sectores como agua potable y saneamiento, medio ambiente, agricultura, minería, energía, salud, obras públicas, gobiernos regionales y municipios. En el caso del reúso de AST, esta coordinación es aún más importante porque el recurso se origina en el sistema sanitario, pero sus posibles usos pueden estar fuera del ámbito sanitario tradicional.

Para la Región de Antofagasta, esta idea permite identificar actores clave como SISS, Empresas Sanitarias, DGA, DOH, Ministerio de Salud, Ministerio del Medio Ambiente, GORE, municipios, usuarios industriales, sector minero, agricultura, comunidades y eventuales operadores o compradores del agua tratada. La literatura revisada sugiere que,

sin la coordinación entre estos actores, el reúso puede quedar limitado a experiencias puntuales y proyectos aislados.

- **La gobernanza del reúso debe incorporar actores, poder e inclusión efectiva**

Además de la coordinación institucional, varios documentos profundizan en la necesidad de analizar los actores, sus intereses, capacidades y niveles de poder. Esto se observa especialmente en el artículo sobre gobernanza inclusiva, la herramienta diagnostica de gobernanza y los textos sobre coordinación intersectorial. La idea que se repite es que una política técnicamente correcta puede fracasar su no considera la oposición de actores relevantes, la falta de incentivos, la baja legitimidad social o la ausencia de grupos que apoyen activamente su implementación. También se advierte que la participación no debe ser solo formal, sino que debe permitir influencia real en la toma de decisiones. Esto significa que el análisis institucional no debe limitarse a listar organismos públicos, sino que debe identificar roles, competencias, intereses, conflictos, posibles resistencias y niveles de influencia.

Esta mirada es especialmente pertinente en Antofagasta, donde la minería, las sanitarias, los servicios públicos, los municipios y las comunidades pueden tener expectativas distintas respecto del reúso del agua tratada.

- **La información, trazabilidad y monitoreo son condiciones básicas para una buena gobernanza**

Otra idea recurrente es que no puede existir buena gobernanza del agua sin información confiable, actualizada y trazable. Esta idea aparece en documentos como *Water accounting*, *Cyber-physical systems in water management and governance*, los artículos sobre teledetección, LiDAR, monitoreo satelital, catastro de AST, informe SISS y estudios de modelación hidrológica. Los documentos coinciden en que se requieren datos sobre oferta, demanda, calidad, ubicación de fuentes, infraestructura, costos, usuarios, riesgos y evolución temporal del recurso. En el caso del reúso, esto implica contar con catastros actualizados de PTAS, volúmenes tratados, puntos de descarga, calidad del efluente, usos actuales, usuarios potenciales y condiciones operacionales. Para la investigación, esta idea permite justificar la necesidad de construir una base de antecedentes organizada y verificable para Antofagasta. También abre la posibilidad de incorporar sistemas de monitoreo, indicadores, reportabilidad y trazabilidad como parte de una futura propuesta de gobernanza del reúso.

- **El reúso debe evaluarse bajo un enfoque de riesgo y sostenibilidad**

Varios documentos coinciden en que el reúso no debe evaluarse solo por su factibilidad técnica o económica, sino también por sus riesgos sanitarios, ambientales, sociales e institucionales. Esta idea aparece en el marco de evaluación de riesgo y sostenibilidad, en

las guías internacionales de reúso, en los estudios sobre aceptabilidad pública, tecnologías microbiológicamente seguras, reúso agrícola y políticas hídricas bajo cambio climático. El enfoque de riesgo permite analizar exposición, vulnerabilidad, peligros sanitarios, calidad del agua, fallas operacionales y percepción pública. El enfoque de sostenibilidad permite incorporar variables ambientales, sociales y económicas, tales como reducción de presión sobre fuentes naturales, costos, energía, aceptación social, protección de ecosistemas y resiliencia territorial. Esta idea permite proponer que el reúso de AST en Antofagasta debe evaluarse mediante criterios integrados, y no únicamente desde la disponibilidad de caudales. Un proyecto puede tener agua disponible, pero no ser viable si no cumple estándares de calidad, si genera riesgos sanitarios, si carece de aceptación social o si no tiene claridad institucional.

- **Las tecnologías deben seleccionarse según el uso final y el contexto territorial**

La literatura técnica revisada muestra una amplia variedad de tecnologías: lodos activados, humedales construidos, zanjas ecológicas, sistemas algales, reactores fotocatalíticos de membrana, tratamiento terciario, osmosis inversa, sistemas modulares, plantas pequeñas y soluciones descentralizadas. Sin embargo, la idea que se repite no es que exista una tecnología única optima, sino que la selección debe depender del contexto y del uso final. Los documentos sobre Brasil, Austria, humedales, zanjas ecológicas, tecnologías algales, sistemas modulares y guías internacionales coinciden en que la tecnología debe evaluarse considerando calidad requerida, costos, operación, mantenimiento, energía, capacidades locales, escala territorial y riesgos asociados. Para Antofagasta, esto implica que no se puede definir una solución tecnológica sin antes determinar el uso potencial del agua regenerada. No es lo mismo reutilizar para riego de áreas verdes, procesos industriales, minería, recarga ambiental o agricultura. Cada uso requiere un estándar de calidad, un nivel de tratamiento y un esquema de control diferente.

- **El reúso se vincula con la economía circular y valorización de recursos**

Otra idea repetida en los documentos es que aguas residuales no solo contienen agua recuperable, sino también energía, nutrientes y subproductos que pueden ser valorizados. Esto aparece en los estudios sobre economía circular en PTAS, reúso y reciclaje de lodos en Taiwan, producción de hidrogeno desde las aguas residuales, tecnologías algales, humedales y tratamientos de nutrientes. Esta mirada permite ampliar el enfoque tradicional del saneamiento. La PTAS deja de ser solo una infraestructura de disposición o cumplimiento normativo, y pasa a ser una instalación estratégica para recuperar recursos, reducir impactos ambientales y aportar a la sostenibilidad territorial. En la investigación, esta idea es útil para plantear que el reúso de AST en Antofagasta puede formar parte de una política de economía circular del agua, especialmente considerando la alta demanda de recursos hídricos de sectores productivos y la necesidad de reducir descargas no aprovechadas.

- **La aceptación social es una condición crítica para el éxito del reúso**

Los documentos sobre aceptabilidad pública, gobernanza inclusiva, análisis de actores y experiencias internacionales coinciden en que el reúso puede enfrentar barreras culturales, percepción de riesgo, desconfianza y falta de información. Aunque el agua cumpla con estándares técnicos, la implementación puede verse limitada si los usuarios o comunidades no confían en la seguridad del sistema. Esta idea se repite especialmente en experiencias de países áridos, donde el reúso es técnicamente necesario, pero socialmente sensible. Por ello, la literatura destaca la importancia de campañas de educación, transparencia, monitoreo público, participación temprana y comunicación clara sobre usos permitidos y riesgos controlados. Esto permite incorporar la aceptación como parte de la gobernanza, donde podrían coexistir usos industriales, urbanos, ambientales o agrícolas, la legitimidad del reúso dependerá también de cómo se informe, quien participa y como se distribuyen los beneficios.

- **La planificación Hídrica debe incorporar escenarios futuros e incertidumbre climática**

Finalmente, varios documentos destacan que la planificación del agua debe considerar escenarios de cambio climático, crecimiento de demanda, incertidumbre y adaptación progresiva. Esta idea aparece en los estudios sobre planificación hídrica en Inglaterra, políticas bajo cambio climático, modelos hidrológicos, análisis de sensibilidad, planificación adaptativa y evaluación de estrategias nacionales. La literatura coincide en que las soluciones rígidas o de corto plazo son insuficientes frente a escenarios de incertidumbre. Por ello, el reúso debe evaluarse como parte de una estrategia flexible, capaz de adaptarse a cambios en disponibilidad, demanda, normativa, tecnología y prioridades territoriales. Esto permite reforzar que el reúso de AST en Antofagasta debe analizarse como una mirada de largo plazo, no solo como una respuesta inmediata a la escasez. Su implementación de insertarse en una planificación hídrica regional que considere crecimiento urbano, presión productiva, cambio climático, nuevas fuentes y coordinación institucional.

A6. Tabla de Integración de Asignaturas MWM para el Estudio del Reúso de AST

Asignatura	Aportes Conceptuales	Aportes Técnicos	Aportes Normativos	Aportes de Gestión
MWM 410: Gestión de la depuración y reutilización	El paso del efluente de "residuo" a "recurso estratégico" en una economía circular.	Criterios de calidad **"fit for purpose"** según el uso final (riego, industria, minería).	Análisis de las normas de calidad sugeridas para reúso (NCh 3456) frente al DS 90/00.	Desafíos de implementación, operación y mantención en soluciones de reúso.
MWM 500: Gobernanza y economía del agua	Modelo de **Sinergia de Gobernanza** (Jerarquía, Red y Mercado) para la coordinación intersectorial.	Valoración económica del agua (uso y no uso) y metodologías como el costo de viaje o precios hedónicos.	Roles de la **SISS, DGA y DOH**; brechas en la institucionalidad hídrica y derechos de aprovechamiento.	Gobernanza multinivel de la OCDE para cerrar brechas de financiamiento, información y política.
MWM 530: Sistemas de gestión	Filosofías de **Excelencia Operacional** (Lean Thinking) y Gestión de Calidad Total (TQM).	Herramientas cuantitativas de medición de eficiencia como el **Análisis Envolvente de Datos (DEA)**.	Implementación de normas internacionales de gestión (ISO 9001, ISO 46001 de eficiencia hídrica).	Planificación operativa, control de procesos mediante indicadores (KPI) y mejora continua (Ciclo PDCA).
MWM 120: Gestión de captación y tratamiento de agua	Entendimiento del ciclo hidrológico y la calidad del agua como sustento de la salud pública.	Procesos de remoción de carga orgánica (DBO5), nutrientes (N y P) y coliformes en PTAS convencionales y avanzadas.	Estándares de emisión para descargas a cuerpos de agua fluviales, lacustres y marinos (DS 90).	Fiscalización y monitoreo de la calidad de efluentes en plantas de tratamiento.
MWM 140: Riesgo y conflicto en la gestión	El riesgo como una construcción multidimensional (vulnerabilidad, amenaza y exposición).	Modelos de análisis de fallos y riesgos antrópicos (HAZOP, FTA, ETA) aplicados a sistemas hídricos.	Marco de Sendai para la reducción del riesgo y el rol del SINAPRED.	Gestión de asimetrías de poder y conflictos de interés entre minería, agricultura y consumo humano.
MWM 400: Gestión de redes	Concepto de **"Smartwater"** para la gestión inteligente y transparente de redes.	Tecnologías de monitoreo (**telemetría, SCADA, GIS**) y detección proactiva de fugas (robots, satélites, acústicos).	Regulación nacional de redes sanitarias, concesiones marítimas y planes de desarrollo fiscalizados por la SISS.	Planes de reducción de pérdidas físicas y comerciales para optimizar la oferta hídrica.

MWM 420: Gestión del sistema pluvial	Enfoque de **Infraestructura Azul-Verde** y ciudades resilientes al clima (Sponge City).	Modelación hidrológica e hidráulica de redes urbanas y cauces naturales (EPA-SWMM, HEC-RAS).	Ley de Aguas Lluvias (19.525) y Planes Maestros de evacuación y drenaje.	Proyectos multipropósito (parques inundables) que integran paisaje y manejo de excedentes hídricos.
MWM 540: Gestión de clientes	Diseño de servicios centrado en la experiencia del usuario y potenciación de la empatía.	Herramientas de observación cualitativa (AEIOU) y modelado de sistemas complejos (Gigamaps).	Normativas de atención al cliente y responsabilidad ante cortes de suministro o deficiencias en la calidad.	Estrategias de comunicación para mejorar la **aceptación social** y gestionar la percepción de riesgo del reúso.
MWM 550: Innovación y gestión de proyectos	El proceso de innovación como un viaje desde la creatividad hasta el reconocimiento societal.	Metodologías de diseño de modelos de negocio (**Canvas, NABC**) para estructurar proyectos.	Propiedad intelectual, patentes de invención y requisitos de novedad y aplicación industrial.	Planificación estratégica de largo plazo e integración de la innovación en la mentalidad empresarial.

Fuente: elaboración propia, a partir de la revisión de los contenidos abordados en las asignaturas del Magíster del Agua.

A7. Integración de Dimensiones para el Estudio de Reúso de AST.

Los aportes fueron clasificados según dimensiones definidas para el desarrollo de la tesina: técnica, normativa y de gobernanza o gestión.

- **Dimensión Técnica**

Esta dimensión abarca los procesos físicos, tecnológicos y operativos necesarios para el tratamiento y distribución del recurso. En el tratamiento y calidad del efluente, se analizan tecnologías como lodos activados, reactores biológicos de membrana (MBR) y humedales construidos, evaluando su capacidad de remoción de parámetros críticos como DBO5, nutrientes (nitrógeno y fósforo), solidos suspendidos y coliformes fecales. El enfoque principal es que el agua sea “fit for purpose”(apta para el propósito) según su uso final. Para la gestión de redes e infraestructura, se incluye el diseño y operación de redes de conducción, estacionamientos de bombeo y sistemas de distribución. Se destaca el uso de tecnologías de Smartwater como telemetría, SCADA y GIS para el monitoreo en tiempo real y la detección proactiva de fugas mediante robots, sensores acústicos e imágenes satelitales. Finalmente, la evaluación de recursos y eficiencia aporta métodos cuantitativos como Análisis de Envolvente de Datos (DEA) para medir la eficiencia operativa y técnica de las empresas sanitarias. Se consideran herramientas de optimización para la planificación hídrica y el manejo de inventarios críticos.

- **Dimensión Normativa y Regulatoria**

Se enfoca en el marco legal, los estándares y las responsabilidades institucionales en Chile. La legislación sanitaria y el marco sectorial analiza el rol de la SISS, DGA y DOH, basándose en cuerpos legales como el Código de Aguas y la Ley de Servicios Sanitarios (DFL 382/88). Se identifican brechas criticas como la falta de una norma integral específica para el reúso a gran escala y la incertidumbre sobre la propiedad del efluente. Las Normas de Calidad y Fiscalización, definen los estándares de emisión para descargas (DS90/00) y las directrices para el reúso en riego (NCh 3456). También incorpora marcos internacionales como el Sendai para la gestión de riesgos y la normativa sobre manejo de lodos (DS 04/09). La regulación económica y tarifaria aborda el concepto de monopolio natural y los modelos de fijación de precios (empresa modelo, Price-cap), así como la gestión de subsidios cruzados y la transparencia en la rendición de cuentas.

- **Dimensión de Gobernanza y Gestión**

Esta dimensión trata sobre la articulación de actores, la planificación estratégica y la sostenibilidad social del proyecto. La gestión integrada y coordinación se fundamenta en el modelo de Gobernanza Multinivel de la OCDE, buscando cerrar brechas de información, políticas y financiamiento. Promueve la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) para coordinar horizontalmente sectores como minería, agricultura y saneamiento. El análisis de actores y toma de decisiones utiliza herramientas como la Matriz Interés-Poder para identificar Stakeholders clave y gestionar conflictos de interés. La gestión de clientes se enfoca en potenciar la empatía la aceptación social del reúso para reducir la percepción de riesgo en la población. La planificación estratégica y sostenibilidad integra el reúso

dentro de una visión de economía circular, transformando el residuo en un activo estratégico regional. Utiliza metodologías de diseño de negocios (Canvas, NABC) e innovación para asegurar la viabilidad de largo plazo frente al cambio climático.

La integración de los aportes del Magíster según las dimensiones técnica, normativa y de gobernanza fue utilizada como soporte para definir los criterios posteriormente incorporados en la aplicación metodológica, el detalle de esta clasificación se presenta en la siguiente tabla.

Tabla de Integración de Dimensiones para el Estudio de Reúso de AST.

Dimensión	Subtemas y Variables Clave	Aportes Principales de las Asignaturas MWM	Enfoque y Aplicación en la Investigación (Antofagasta)
TÉCNICA	• Tratamiento de AST y tecnologías.• Calidad del efluente.• Infraestructura sanitaria y redes.• Eficiencia hídrica y evaluación de recursos.	• **MWM 410 y 120:** Tecnologías de remoción de carga orgánica (DBO5), nutrientes (N y P) y coliformes mediante lodos activados, MBR y humedales.• **MWM 400:** Concepto de **"Smartwater"** (telemetría, SCADA, GIS) para monitoreo y control de redes en tiempo real.• **MWM 130:** Criterios de productividad y optimización para el uso eficiente del recurso.	• Evaluación de la aptitud del efluente (**"fit for purpose"**) para usos industriales o mineros según la calidad actual de las PTAS locales.• Identificación de limitaciones físicas en la infraestructura de conducción hacia usuarios potenciales en zonas áridas.
NORMATIVA Y REGULATORIA	• Legislación sanitaria (Chile).• Normas de calidad y estándares de control. • Fiscalización, permisos y responsabilidades. •Marco regulatorio del sector.	• **MWM 500 y 400:** Análisis del **Código de Aguas** (DFL 1.122) y la Ley de Servicios Sanitarios (DFL 382/88).• **MWM 410:** Contraste entre la norma de emisión **DS 90/00** y las directrices de reúso en riego **NCh 3456**.• **MWM 520:** Modelos de regulación económica, tarifas (empresa modelo) y asignación de costos fijos.	• Diagnóstico de la **brecha regulatoria** integral en Chile para el reúso de AST a gran escala.• Análisis de la incertidumbre jurídica sobre la **propiedad del efluente** y las responsabilidades de descarga.

GOBERNANZA Y GESTIÓN	• Coordinación institucional y multinivel.• Planificación hídrica estratégica.• Gestión Integrada (GIRH).• Análisis de actores y sostenibilidad.	• **MWM 500:** Modelo de **Sinergia de Gobernanza** (Jerarquía, Red y Mercado) y gobernanza multinivel de la OCDE para cerrar brechas de información y políticas.• **MWM 140 y 540:** Herramientas de análisis de actores (**Matriz Poder-Interés**) y gestión de la percepción de riesgo del usuario.• **MWM 100 y 510:** Marco de la **Economía Circular** para valorizar el AST como activo estratégico regional.	• Propuesta de un modelo de coordinación intersectorial (GIRH) que articule a la SISS, mineras, agricultura y el gobierno regional.• Estrategias para mejorar la **aceptación social** del reúso mediante transparencia y educación ambiental.

Fuente: elaboración propia, a partir de la revisión de los contenidos abordados en las asignaturas del Magíster del Agua y su vinculación con el estudio del reúso de aguas servidas tratadas en la Región de Antofagasta.

A continuación, se señalan otros aportes de la sistematización de antecedentes.

- **Propósito metodológico de la recopilación de información**

La recopilación y sistematización de antecedentes permitió consolidar una base de información estructurada para analizar el caso de estudio desde una perspectiva integral. Esta etapa permitió transformar los antecedentes técnicos, normativos e institucionales ya revisados en insumos metodológicos aplicables al análisis del reúso de AST. Se identificaron los principales sistemas de tratamiento y disposición de aguas servidas de la Región de Antofagasta, sus condiciones operacionales, tecnologías utilizadas, caudales tratados, destinos actuales de los efluentes, normas aplicables, actores involucrados y posibles condiciones habilitantes para el reúso. La Tabla resume los propósitos alcanzados estructurados de acuerdo con las dimensiones técnica, operacional, normativa, institucional y de fiscalización.

Propósito alcanzado según dimensión de análisis.

Dimensión	Información sistematizada	Resultado obtenido
Técnica	Tecnologías de tratamiento, caudales, calidad del efluente e infraestructura sanitaria.	Línea base técnico-operacional de PTAS, emisarios y sistemas de disposición.
Operacional	Funcionamiento actual de los sistemas, destino de efluentes y experiencias de reúso.	Identificación de sistemas con reúso actual, local o potencial condicionado.

Normativa	D.S. N°90/2000, D.S. N°46/2002, NCh 1.333, RCA, autorizaciones y programas de monitoreo.	Matriz normativa preliminar y reconocimiento de brechas regulatorias.
Institucional	Actores públicos, empresas sanitarias, operadores, usuarios y organismos fiscalizadores.	Identificación de roles, competencias y relaciones de gobernanza.
Económica	Infraestructura requerida, demanda potencial, costos y modelos de negocio.	Reconocimiento de condiciones técnico-económicas que inciden en el reúso.
Fiscalización	Origen, calidad, volumen, punto de entrega, usuario, uso autorizado y reportabilidad.	Base inicial para una matriz de trazabilidad y control.

Fuente: *Elaboración propia.*

- **Fuentes de información recopiladas y criterios de selección**

Durante la actividad se utilizaron fuentes primarias y secundarias. Las fuentes primarias, correspondieron a antecedentes provenientes del sistema sanitario regional, información operacional, fiscalizaciones, experiencia profesional, panel de expertos y antecedentes recabados desde actores vinculados al tratamiento, disposición y eventual reúso de AST. Las fuentes secundarias correspondieron a normativa vigente, informes técnicos, estudios académicos, documentos institucionales, catastros sectoriales, antecedentes de la SISS, estudios regionales, publicaciones sobre gobernanza del agua y documentos asociados a experiencias nacionales e internacionales. En la Tabla se detallan las fuentes de información primarias y secundarias consultadas, precisando los datos extraídos y su aplicación metodológica en el estudio.

Fuentes utilizadas en la sistematización de antecedentes

Tipo de fuente	Fuente revisada	Información obtenida	Uso en la investigación
Primaria	Antecedentes SISS y fiscalizaciones	Estado operacional, cumplimiento normativo, observaciones de terreno y condiciones de fiscalización.	Sustentar el diagnóstico técnico y fiscalizador.
Primaria	Información de empresas sanitarias y operadores	Caudales, tecnologías, destino de efluentes, operación y proyectos.	Caracterizar los sistemas regionales.
Primaria	Experiencia profesional y antecedentes territoriales	Funcionamiento real de sistemas, coordinación institucional y problemáticas regionales.	Complementar el análisis aplicado.
Primaria	Panel de expertos	Criterios técnicos, regulatorios, operacionales y de gobernanza.	Validar brechas y priorizar criterios.

Secundaria	Normativa vigente	Normas de descarga, criterios de calidad, permisos y autorizaciones.	Identificar marco regulatorio y vacíos normativos.
Secundaria	Informes SISS	Cobertura, PTAS, reúso directo, disposición de efluentes y contexto sectorial.	Construir línea base nacional y regional.
Secundaria	Submesa de Reúso 2020	Volúmenes de AST, destino de efluentes y potencial recuperable.	Dimensionar el potencial regional de reúso.
Secundaria	Estudios técnicos regionales	Infraestructura, demanda, costos, alternativas de reúso y usuarios potenciales.	Analizar factibilidad técnico-económica.
Secundaria	Estudios académicos	Gobernanza, regulación, economía circular, calidad y reúso.	Sustentar el enfoque conceptual y metodológico.

Fuente: *Elaboración propia con base en antecedentes documentales de la investigación.*

- **Sistematización de antecedentes por dimensiones de análisis**

La información recopilada fue ordenada en matrices temáticas, con el propósito de comparar antecedentes y vincularlos con las dimensiones centrales de la investigación. Esta sistematización permitió pasar desde una revisión documental general hacia una base de análisis estructurada. Se organizaron los antecedentes en seis dimensiones: técnica, operacional, normativa, calidad del efluente, gobernanza y fiscalización. Esta clasificación permitió identificar qué información era necesaria para evaluar la viabilidad del reúso y qué antecedentes debían ser considerados posteriormente en el diagnóstico y en la identificación de brechas. La Tabla describe las dimensiones operativas utilizadas para clasificar la información y las variables clave consideradas en la caracterización de los sistemas.

Dimensiones utilizadas para sistematizar la información

Dimensión	Información ordenada	Variables consideradas
Técnica	Características de plantas, emisarios, tecnologías y sistemas de tratamiento.	Tipo de tratamiento, nivel de depuración, desinfección, lodos e infraestructura disponible.
Operacional	Funcionamiento actual de los sistemas.	Caudal medio, caudal máximo, volumen mensual, carga orgánica, destino del efluente.
Normativa	Marco regulatorio aplicable.	D.S. N°90/2000, D.S. N°46/2002, RCA, autorizaciones sanitarias y programas de monitoreo.
Calidad del efluente	Parámetros físicos, químicos y microbiológicos.	DBO5, SST, pH, coliformes, nitrógeno, fósforo, aceites y grasas, cloro residual.

Gobernanza	Actores, competencias y coordinación institucional.	SISS, ECONSSA, Aguas Antofagasta, TRATACAL, DGA, DOH, MINSAL, MMA, DIRECTEMAR, GORE, municipios y usuarios.
Fiscalización y trazabilidad	Información necesaria para verificar el uso seguro del efluente.	Origen, calidad, volumen, punto de entrega, usuario, uso autorizado, reportabilidad y contingencia.

Fuente: *Elaboración propia.*

- **Línea base técnico-operacional del caso de estudio**

Como resultado de la recopilación, se consolidó una línea base técnico-operacional de los principales sistemas de tratamiento, disposición y potencial reúso de aguas servidas tratadas en la región. Esta base permitió distinguir sistemas con tratamiento secundario, sistemas de pretratamiento con descarga marina, sistemas de menor escala y experiencias actuales o potenciales de reúso. La información recopilada permitió reconocer que en la región coexisten sistemas con reúso productivo, sistemas con reúso local, sistemas con descarga continental y sistemas costeros con potencial condicionado a tratamiento adicional. En la Tabla se presenta la línea base operacional de los nueve sistemas sanitarios regionales evaluados, especificando sus tecnologías, caudales de referencia y condición frente al reúso.

Línea base operacional de sistemas regionales considerados

Sistema	Tipo de tratamiento o disposición	Dato operacional relevante	Condición frente al reúso
PTAS Antofagasta	Lodos activados	95 l/s caudal medio actual; 120 l/s de diseño; 9.504 m³/d caudal máximo día.	Reúso productivo asociado a uso industrial/minero.
Emisario Submarino Antofagasta	Pretratamiento y descarga marina	1.070 l/s caudal máximo puntual de diseño; 92.488 m³/d caudal máximo día.	Potencial condicionado a tratamiento adicional.
PTAS Calama	Lodos activados	266 l/s caudal medio; 689.472 m³/mes tratados.	Potencial uso productivo sujeto a evaluación técnica y normativa.

PTAS Baquedano	Lodos activados	3,88 l/s caudal medio; 10.057 m³/mes tratados.	Riego de áreas verdes o uso local.
PTAS Sierra Gorda	Lodos activados	5,3 l/s caudal medio; 13.738 m³/mes tratados.	Riego local y eventual uso productivo.
PTAS San Pedro de Coloso	Lombrifiltro	1,0 l/s caudal medio; estanque de 50 m³.	Reúso local para riego de áreas verdes.
Emisario Mejillones	Pretratamiento y descarga marina	18 l/s caudal medio actual; 26,6 l/s diseño.	Reúso condicionado a tratamiento secundario o terciario.
Emisario Taltal	Pretratamiento y descarga marina	20 l/s caudal medio actual; 22,3 l/s diseño.	Potencial condicionado a demanda e infraestructura.
Emisario Tocopilla	Pretratamiento y descarga marina	38,35 l/s caudal medio actual; 62 l/s diseño.	Potencial condicionado a tratamiento complementario.

Fuente: *Elaboración propia con base en antecedentes operacionales regionales sistematizados en la investigación.*

- **Línea base ambiental y potencial regional de reúso**

La sistematización de antecedentes permitió dimensionar el potencial regional de reúso desde una perspectiva ambiental y territorial. Para el año 2019, la Región de Antofagasta registró un volumen 41.463.124 m³/año de aguas servidas urbanas tratadas. De ese total, 27.974.957 m³/año fueron descargados al mar, 13.376.652 m³/año a cauce superficial continental y solo 111.515 m³/año fueron destinados a riego. Estos antecedentes permitieron identificar que la mayor oportunidad de recuperación hídrica se encuentra asociada a los caudales descargados al mar, dado que representan volúmenes que actualmente no son reincorporados a usos continentales.

La Tabla consolida la línea base ambiental de la región, destacando la distribución de los volúmenes de efluentes descargados al mar y cauces continentales, junto con su potencial de riego equivalente.

Línea base ambiental y potencial de reúso en Antofagasta

Indicador	Año	Dato	*Lectura metodológica*
AST tratadas en Antofagasta	2019	41.463.124 m³/año	Volumen base para evaluar valorización del efluente.
AST descargadas al mar	2019	27.974.957 m³/año	Principal oportunidad para recuperación hídrica neta.
AST descargadas a cauce superficial continental	2019	13.376.652 m³/año	Requiere análisis de balances hídricos y usos aguas abajo.
AST destinadas a riego	2019	111.515 m³/año	Evidencia que el reúso directo regional sigue siendo marginal.
Caudal potencialmente reusable desde descarga marina	2019	0,93 m³/s	Potencial estratégico para nuevas fuentes no convencionales.
Superficie regable estimada	2019	3.684 ha	Permite dimensionar beneficio territorial potencial.

Fuente: *Elaboración propia*

- **Sistematización normativa y brechas preliminares**

La información normativa recopilada permitió diferenciar entre cumplimiento de descarga y condiciones requeridas. Esta distinción resultó relevante dado que los sistemas pueden cumplir la normativa de emisión aplicable a su cuerpo receptor, pero ello no implica que el efluente sea apto para un uso posterior sin tratamiento adicional o sin medidas de control sanitario. En particular, se identificó que los emisarios submarinos descargan bajo exigencias asociadas al D.S. N°90/2000, pero cuando la descarga se realiza fuera de la Zona de Protección Litoral, la Tabla 5 no exige coliformes fecales. Esta situación fue registrada como una brecha crítica para el análisis de reúso, dado que usos como riego de áreas verdes, riego agrícola, uso urbano no potable o aplicaciones con exposición humana requieren control microbiológico.

- **Sistematización institucional y de gobernanza**

La recopilación institucional permitió identificar los actores que inciden en el tratamiento, disposición, autorización, fiscalización, financiamiento y uso potencial de las AST. Esta revisión permitió reconocer que el reúso no depende exclusivamente de la operación sanitaria, sino de una red de competencias distribuidas entre organismos públicos,

empresas operadoras, usuarios productivos y actores territoriales. Se sistematiza la matriz institucional preliminar, identificando los organismos públicos, empresas sanitarias y usuarios clave, así como sus competencias en la gobernanza del recurso.

Matriz institucional preliminar elaborada

Actor	Rol identificado en el sistema	Información recopilada	Relación con el reúso
SISS	Regulación y fiscalización del sector sanitario.	Programas de monitoreo, fiscalizaciones, cumplimiento y antecedentes operacionales.	Actor clave para criterios de control, trazabilidad y fiscalización.
Aguas Antofagasta S.A.	Operación de servicios sanitarios regionales.	Caudales, operación, redes, disposición e infraestructura.	Actor relevante en generación y gestión del efluente.
ECONSSA	Titularidad y operación de concesiones.	Contratos, operación de tratamiento, infraestructura y modelos de gestión.	Incide en decisiones estratégicas sobre reúso.
TRATACAL S.A.	Tratamiento y disposición de aguas servidas.	Información operacional de PTAS y efluentes.	Incide en disponibilidad, continuidad y calidad del efluente.
DGA	Gestión de recursos hídricos y derechos de agua.	Derechos, balances, cauces, disponibilidad y efectos aguas abajo.	Actor clave en sistemas interiores y descargas continentales.
DIRECTEMAR	Autoridad marítima.	Emisarios, descargas marinas, ZPL y condiciones de borde costero.	Relevante en sistemas costeros con descarga al mar.
SEREMI de Salud / MINSAL	Control sanitario.	Criterios de exposición humana, riesgos microbiológicos y autorizaciones.	Fundamental para usos con contacto directo o indirecto.

MMA / SEA / SMA	Evaluación y seguimiento ambiental.	RCA, normas ambientales, compromisos y fiscalización ambiental.	Condicionan proyectos con obras o impactos ambientales.
GORE y municipalidades	Planificación territorial e inversión pública.	Demanda de áreas verdes, proyectos locales y planificación urbana.	Potenciales impulsores de reúso para áreas verdes y usos urbanos.
Minería e industria	Usuarios potenciales.	Demanda, calidad requerida, capacidad de pago y contratos.	Pueden viabilizar el reúso productivo.
Comunidades y usuarios	Aceptación social y legitimidad territorial.	Percepción de riesgos, beneficios y participación.	Relevantes para la sostenibilidad social del reúso.

Fuente: *Elaboración propia*

- **Matriz integrada de antecedentes por sistema**

Como resultado de esta actividad, se diseñó una matriz integrada para registrar y comparar la información de cada planta, emisario o sistema de disposición. Esta matriz permitió ordenar los antecedentes técnicos, normativos, operacionales e institucionales de manera homogénea, facilitando la comparación entre sistemas y su uso posterior en la evaluación de viabilidad. La Tabla expone la estructura de la matriz integrada diseñada para registrar y comparar de manera homogénea los antecedentes de cada planta o emisario.

Matriz integrada para registrar antecedentes por sistema

Ítem	Variable	Dato sistematizado	Uso posterior
1	Localidad o sistema	Nombre de la PTAS, emisario o sistema de disposición.	Identificación del caso.
2	Titular u operador	Empresa sanitaria, ECONSSA, TRATACAL u otro operador.	Análisis institucional.
3	Tipo de tratamiento	Lodos activados, lombrifiltro, pretratamiento, emisario, laguna u otro.	Evaluación técnica.
4	Caudal tratado	Caudal medio, máximo, volumen mensual o anual.	Evaluación de disponibilidad.

5	Calidad del efluente	DBO5, SST, pH, coliformes, nutrientes, grasas, metales.	Evaluación de aptitud para reúso.
6	Destino actual	Mar, cauce, riego, uso industrial, áreas verdes o infiltración.	Diagnóstico de disposición.
7	Norma aplicable	D.S. N°90, D.S. N°46, RCA, autorización sanitaria o decreto.	Matriz normativa.
8	Uso actual o potencial	Minería, industria, riego, áreas verdes, reúso interno o recarga.	Evaluación de oportunidades.
9	Infraestructura requerida	Conducción, impulsión, estanque, tratamiento adicional o medición.	Evaluación técnico-económica.
10	Actores involucrados	Organismos públicos, operador, usuario y fiscalizador.	Análisis de gobernanza.
11	Brecha identificada	Técnica, normativa, operacional, económica o institucional.	Identificación de barreras.
12	Nivel de trazabilidad	Medición, control, reporte, usuario y destino definido.	Propuesta de fiscalización.

Fuente: *Elaboración propia*

El desarrollo de la actividad permitió ordenar los antecedentes técnicos, normativos, operacionales e institucionales, mediante la recopilación y sistematización de información, se construyó una base metodológica que permitió identificar sistemas relevantes, caudales disponibles, destinos actuales del efluente, normas aplicables, actores involucrados y condiciones preliminares para evaluar la viabilidad del reúso. Esta actividad permitió confirmar que el análisis no puede limitarse a la existencia de AST, sino que debe considerar la calidad del efluente, el tipo de tratamiento, la infraestructura disponible, la normativa aplicable, las responsabilidades institucionales, los costos, la demanda potencial, la trazabilidad y los mecanismos de fiscalización. En consecuencia, los productos generados en esta etapa servirán como base para las actividades posteriores de la propuesta metodológica, especialmente para la definición de criterios de evaluación, el diagnóstico del estado actual, la identificación de brechas y la formulación de lineamientos técnico-regulatorios y de fiscalización.

ANEXO B. SITUACIÓN ACTUAL DEL TRATAMIENTO EN LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA.

B1. Sistemas de tratamiento

En la Región de Antofagasta se observa una diversidad de sistemas de tratamiento y disposición de las aguas servidas, donde coexisten plantas con tratamiento secundario, sistemas de pretratamiento asociado a emisarios submarinos y experiencias de reúso directo para fines productivos o de riego.

En primer lugar, destaca la PTAS de Antofagasta mediante lodos activados, operada por ECONSSA, la cual trata parte de las aguas servidas de la ciudad mediante un sistema secundario orientado a la remoción de DBO5, Solidos Suspendidos Totales y Coliformes Fecales. El sistema considera pretratamiento, tratamiento primario, reactores biológicos, sedimentadores secundarios, desinfección con hipoclorito de sodio, medición de caudal efluente y piscina de acumulación de aguas tratadas de aproximadamente 1000 m³ para venta de uso industrial.

- **Sistema de Disposición Emisario Submarino Antofagasta (Pretratamiento):**

El sistema principal de disposición final de la ciudad tiene como objetivo la evacuación de aguas servidas domesticas mediante la dilución marina, asegurando el cumplimiento de la Tabla 5 del D.S. 90/00, esta se compone de:

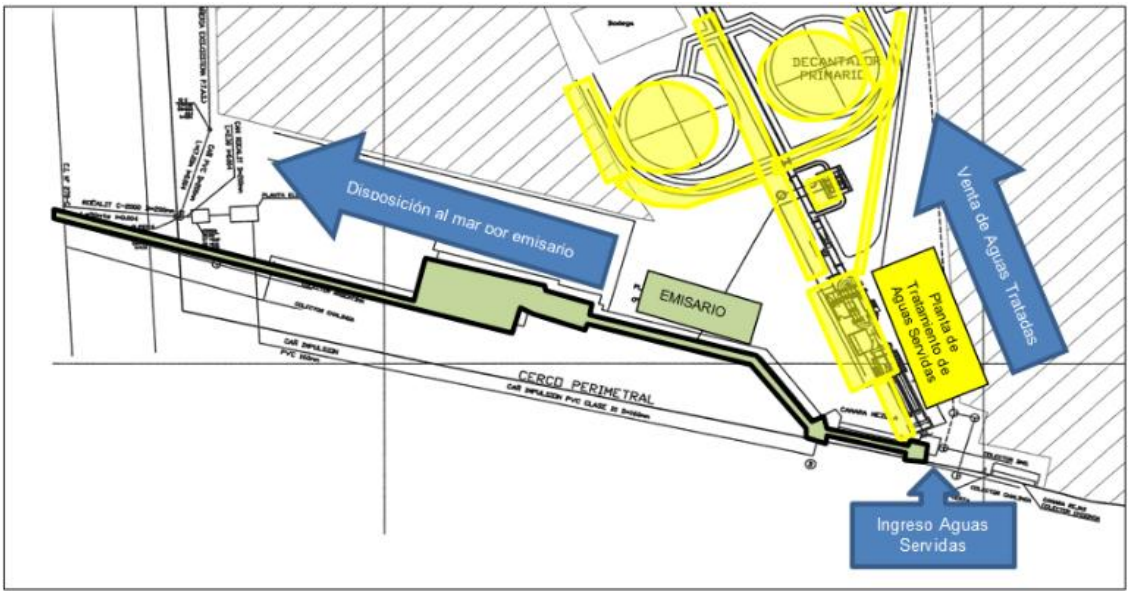
I. **Infraestructura de Pretratamiento (PPTAS):** El proceso comienza con una etapa física diseñada para retener solidos y proteger el ducto. Cuenta con rejas gruesas y finas, seguidas de canales desgrasadores y desarenadores.

II. **Conducción y Descarga:** El efluente pretratado es transportado por un emisario terrestre hasta una cámara de carga. Desde allí se interna en el mar a través de un emisario submarino de 970 metros de longitud. Que termina en dos difusores de 40 metros cada uno para maximizar la dilución.

III. **Capacidad de Diseño:** Con una proyección al año 2020, el sistema fue dimensionado para una población de 401.090 habitantes, con un caudal puntual de 1.070 l/s.

La Figura muestra de manera esquemática la configuración del sistema de disposición de aguas servidas de Antofagasta, identificando sus principales componentes y el flujo del efluente desde el ingreso al sistema hasta su tratamiento y disposición final.

Esquema del sistema de disposición de aguas servidas de Antofagasta



Fuente: *ECONSSA Chile, Licitación Pública: Desarrollo Declaración de Impacto Ambiental Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de 300 l/s Recinto ECONSSA Antofagasta – Bases Técnicas, Figura N°1, revisión abril de 2024.*

- **Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) Secundaria:**

Esta Planta complementa el sistema mediante un tratamiento biológico avanzado orientado a la remoción de carga orgánica (DBO5) y microorganismos patógenos.

I. **Proceso de Lodos Activados:** Utiliza una modalidad de aireación extendida que incluye reactores biológicos y 2 sedimentadores secundarios. Previo a esto el agua pasa por una elevación con tornillos de Arquimides y decantadores primarios de rasqueta que remueven entre el 35% y 40% de los sólidos sedimentables.

II. **Desinfección y Acumulación:** El efluente biológico es sometido a una inyección automática de hipoclorito de sodio en una cámara de contacto. Para asegurar la continuidad del suministro de reúso, la planta cuenta con una piscina de 1000 m3 impermeabilizada con membrana de HDPE.

III. **Gestión de Lodos:** El lodo generado se almacena en un antiguo digestor y se deshidrata en 20 eras de secado (10x10 metros cada una), donde pierde hasta un 75% de humedad antes de ser enviado al vertedero municipal. Se reporta una generación aproximada de 18 toneladas mensuales en base seca.

Una característica distintiva de la operación en Antofagasta es la integración de unidades de almacenamiento y bombeo para transformar el agua tratada en un recurso productivo. El agua de la PTAS es impulsada hacia el estanque Gradon, con capacidad de 3.000 m3.

Este recinto cuenta con tres bombas de 75 kW y un sistema de desinfección de refuerzo para garantizar la calidad requerida por clientes industriales. Desde el Grandon, el recurso es elevado hacia el estanque Salar del Carmen, ubicado en las afueras de la ciudad, donde se realiza una cloración preventiva antes de su entrega final para uso minero.

Por otro lado, existen sistemas de pretratamiento y disposición marina mediante emisarios submarinos, como los identificados en Antofagasta, Taltal Tocopilla y Mejillones. Estos sistemas consideran procesos físicos como medición de caudal, rejas, desarenado y desgrasado, para luego descargar el efluente al mar, conforme a las exigencias de la Tabla 5 del D.S. MINSEGPRES N°90/00. Estas descargas deben ser realizadas fuera de la Zona de Protección Litoral (ZPL), la cual es definida por la autoridad marítima, que tiene la competencia de la jurisprudencia costera. La Tabla presenta los límites máximos de descarga marina del DS N°90/00 identificando los parámetros que requieren tratamiento adicional antes de su reúso.

Parámetros más controlados según sus límites máximos en concentración.

Parámetro	Unidad	Límite máximo permisible
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	300
Sólidos Sedimentables	ml/L/h	20
Aceites y Grasas	mg/L	150
Hidrocarburos Totales	mg/L	20
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	2
SAAM	mg/L	15
pH	Unidad de pH	5,5 – 9

Desde la perspectiva del reúso, estos sistemas presentan un potencial condicionado, dado que el tratamiento primario o pretratamiento permite cumplir con la disposición marina, pero no necesariamente habilita el uso directo del agua para fines productivos, agrícolas o urbanos sin incorporar etapas adicionales de tratamiento secundario, terciario o desinfección avanzada. Esta brecha es coherente con lo señalado por ACADES, en cuanto a que imponer tratamiento secundario a un porcentaje de aguas descargadas por emisarios submarinos no garantiza su reúso si no existe demanda, infraestructura o financiamiento asociado.

También se identifican plantas de tratamiento mediante lodos activados en localidades como Calama, Baquedano y Sierra Gorda.

- **Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Sierra Gorda:**

El sistema está conformado por redes y conducciones de recolección, sin requerir plantas elevadoras de aguas servidas, dado que la topografía permite el escurrimiento gravitacional. La planta posee un tratamiento aeróbico tipo lodos activados, precedido por un tratamiento preliminar, seguido de desinfección y manejo mecánico de lodos.

Posteriormente se dispone en tamizado mediante cámaras de rejas, desarenado y desengrasado, tratamiento biológico aeróbico, desinfección y deshidratado de lodos mediante filtro prensa.

I. **Caudal de diseño hidráulico:** La PTAS presenta una capacidad hidráulica de diseño de 13,6 l/s, evaluada respecto al caudal máximo horario proyectado. La demanda máxima horaria se mantiene entre 10,1 y 10,2 l/s durante el periodo 2023-2038, generando una holgura hidráulica aproximada de 3,4 a 3,5 l/s.

II. **Caudal medio de aguas servidas:** La proyección de demanda muestra un caudal medio total cercano a 2,3 l/s durante todo el horizonte de análisis, con población saneada de 540 habitantes en 2023 y 557 habitantes al año 2038.

III. **Recolección:** La localidad no cuenta con plantas elevadoras de aguas servidas en la etapa de recolección. El colector principal presenta una capacidad de porteo de 19,6 l/s, frente a una demanda máxima estimada de 2,5 l/s manteniendo una holgura de 17,1 l/s durante el periodo evaluado.

IV. **Carga orgánica:** Si bien hidráulicamente existe holgura, el balance de carga orgánica muestra una capacidad de diseño de 95 kgDBO_5/día, frente a una demanda proyectada que supera dicho valor desde 2023, con déficits crecientes. Esto explica que el Plan de Desarrollo contemple ajustes operacionales y mejoras en la línea de lodos.

En el caso de la PTAS de Sierra Gorda, se identifica una condición expresa de reúso de aguas servidas tratadas, dado que el efluente no es descargado a un cuerpo receptor, sino que actualmente es utilizado para riego de árboles. Para el escenario futuro, se proyecta que las aguas serán comercializadas para distintos usos, entre ellos industrial, minero, agrícola, riego de áreas verdes u otros. Este antecedente permite caracterizar a la localidad como una instalación con potencial forma de aprovechamiento del efluente tratado, pasando desde una condición actual de tratamiento parcial por lodos activados hacia un escenario futuro de cumplimiento del D.S. N°90, lo que fortalece su pertinencia como cado de análisis para estrategias de reúso en localidades menores de la segunda región.

- **Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Baquedano:**

Corresponde a un sistema de lodos activados en modalidad aireación extendida. La Planta recibe las aguas servidas recolectadas desde la localidad, las somete a tratamiento preliminar, tratamiento biológico, sedimentación secundaria, desinfección y tratamiento de lodos. Operacionalmente, el sistema se desglosa de la siguiente manera desde una perspectiva de Balance Hídrico:

I. **Caudal de diseño hidráulico:** La PTAS posee una capacidad hidráulica de diseño de **18,0 l/s** para el tratamiento biológico, frente a una demanda máxima horaria proyectada de 10,1 l/s durante el periodo 2023-2038. Por tanto, presenta una holgura hidráulica aproximada de **7,9 l/s** sin proyecto.

II. **Caudal medio de aguas servidas:** La proyección de demanda de aguas servidas muestra una población saneada de 1.067 habitantes en 2023, llegando aproximadamente a 1.100 habitantes en 2038. El caudal medio total se mantiene cercano a 2,7 l/s durante todo el horizonte de análisis.

III. **Conducción de disposición:** El sistema cuenta con una conducción de disposición asociada con capacidad de porteo de 21,2 l/s. La demanda proyectada se mantiene en torno a 9,0–9,1 l/s, por lo que existe una holgura aproximada de 12,1 l/s.

IV. **Carga Orgánica:** En relación con la carga orgánica, presenta una condición favorable, dado que su capacidad de diseño alcanza los 100 kgDBO_5/día, mientras que la demanda proyectada varía entre 69 y 71 kgDBO_5/día durante el período 2023-2038. Lo anterior genera una holgura operacional entre 31 y 29 kgDBO_5/día, por lo que se no se identifica un déficit de tratamiento biológico asociado a carga orgánica en el horizonte del Plan de Desarrollo.

La PTAS de Baquedano, se permite identificar una transición desde una condición actual de uso local del efluente tratado hacia una proyección futura de aprovechamiento más amplio. En la situación actual, al igual que Sierra Gorda las aguas tratadas serán utilizadas para riego de árboles en el entorno de la PTAS. Además, para un escenario futuro, serán comercializadas para distintos usos, tales como industrial, minero, agrícola, riego de áreas verdes u otros. Baquedano se posiciona como una planta con potencial reúso planificado, aunque actualmente el efluente se encuentra asociado a un tratamiento parcial por lodos activados.

En el caso de Calama la PTAS es operada por la sanitaria TRATACAL S.A., mediante el mismo sistema de lodos activados en modalidad a media carga con desinfección posterior. Operacionalmente el sistema se desglosa en las siguientes unidades clave:

I. **Pretratamiento:** Incluye rejas (gruesas y finas) y canales desarenadores con un caudal de diseño de **698,3 l/s.**

II. **Elevación Inicial:** Se realiza mediante PEAS Tornillo, que utiliza tres tornillos de Arquimides con una capacidad actual de porteo de **600 l/s.**

III. **Tratamiento Biológico y Clarificación:** Cuenta con reactores aireados y dos clarificadores secundarios que cubren un área total del **1.711 m²,** lo que otorga una capacidad hidráulica máxima de **594 l/s.**

IV. **Desinfección:** Se aplica gas cloro con una capacidad para caudal medio de **455,6 l/s**, asegurando un tiempo de retención de 30 minutos.

Desde una perspectiva de Balance Hídrico, es fundamental analizar el volumen de agua Disponible tras el proceso. Los datos operacionales indican:

I. **Caudal de Diseño:** La planta está diseñada para un máximo diario de **698,3 l/s,** aunque su capacidad media actual de tratamiento se sitúa en **413 l/s.**

II. **Coeficiente de Recuperación (CR):** Se ha determinado un valor de **0,87,** lo que implica que el 87% del agua potable consumida por la población es recolectada por el sistema de alcantarillado para su tratamiento.

III. **Infiltración:** El sistema debe gestionar un caudal de infiltración de aproximadamente **19,5 l/s,** calculado mediante un método de cloruros en la red de colectores.

IV. **Disposición Final y Potencial de Reúso:** Actualmente, una vez tratadas, las aguas son dispuestas en la Quebrada Quetena a través de una conducción de 800mm de diámetro. Esta descarga constituye el punto de origen para potenciales proyectos de reúso directo, considerando que la carga orgánica domiciliaria proyectada hacia el año 2036, alcanzará los 8.255 kgDBO5/día, según el informe "*Actualización Plan de Desarrollo 2021-2036: Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Calama*". La Figura presenta el esquema de la infraestructura de aguas servidas del sistema Calama, permitiendo identificar las principales unidades de tratamiento, conducción y disposición consideradas en su operación y en la proyección de futuras mejoras del sistema.

El análisis de balance oferta-demanda revela que, sin nuevos proyectos, el sistema enfrentará déficits de capacidad a partir del año 2028 tanto en el tratamiento preliminar como en la clarificación secundaria. Para mitigar esto y asegurar la disponibilidad del recurso para futuros convenios de reúso, el Plan de Desarrollo contempla:

I. Aumento en la capacidad del tratamiento preliminar y un nuevo clarificador secundario para 2028 (+117 l/s).
II. Ampliación de caudal de porteo en la PEAS Tornillo.
III. Instalación de nuevos instrumentos de medición de caudal a la salida de la planta mejorar el balance hídrico.

Este robustecimiento de la infraestructura es esencial para transformar la actual disposición en la Quebrada Quetena en un suministro constante y confiable para sectores industriales o agrícolas de la región. La Tabla 24 presenta los límites máximos permisibles en concentración para descargas marinas del D.S. N°90/00, identificando los parámetros fisicoquímicos que requieren tratamiento adicional antes de su reúso. La Tabla presenta la proyección de la demanda de aguas servidas del sistema de Calama, permitiendo visualizar la evolución esperada de los caudales y su relación con la capacidad operacional considerada para el periodo analizado

Esquema de infraestructura de aguas servidas existentes del sistema Calama

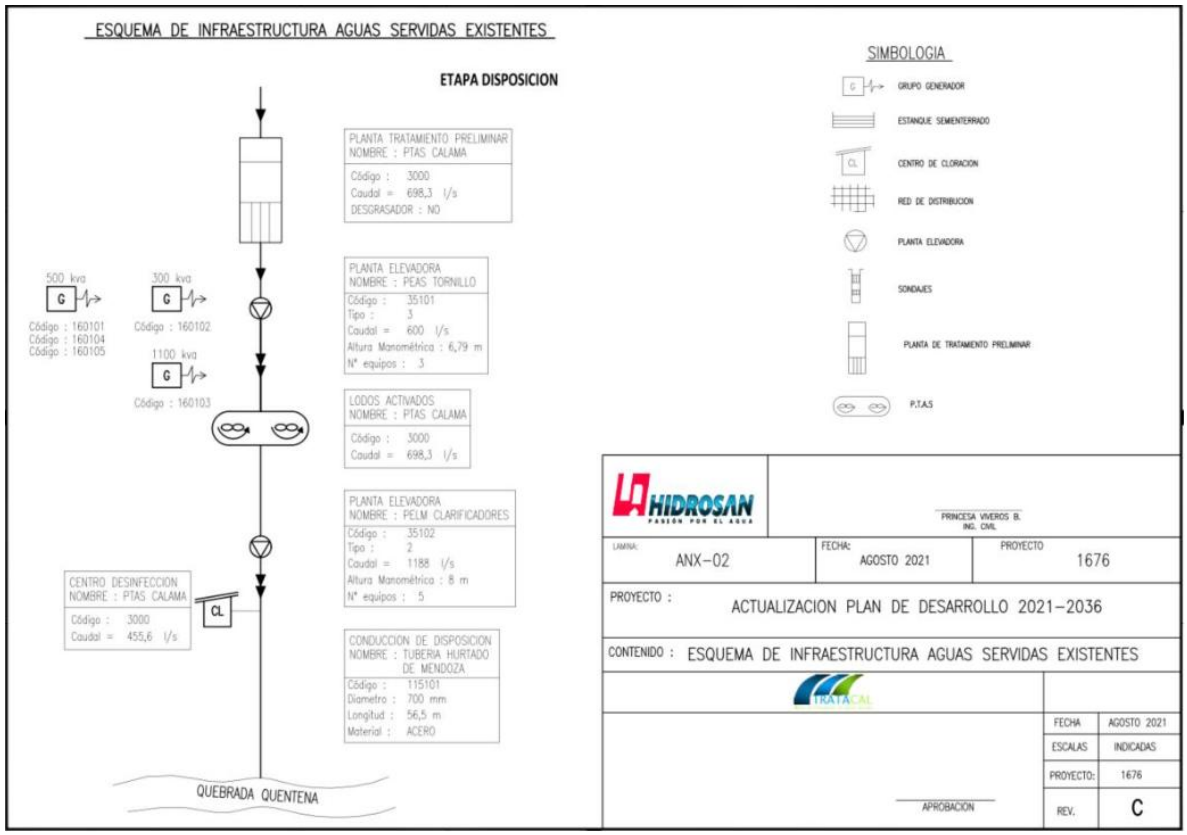


Figura: *TRATACAL S.A., Actualización Plan de Desarrollo 2021–2036, Lámina ANX-02, "Esquema de infraestructura aguas servidas existentes", agosto de 2021.*

Finalmente, la PTAS de San Pedro de Coloso en la localidad de Antofagasta, constituye un caso particular dentro del análisis regional, dado que corresponde a la única planta de tratamiento de aguas servidas tipo Lombrifiltro. Esta instalación, en operación desde el año 2014, trata el 100% de las aguas domiciliarias del sector, asociadas a aproximadamente 97 clientes, mediante una tecnología basada en biofiltración dinámica aeróbica. Su relevancia radica en que el efluente tratado no se orienta exclusivamente a disposición final, sino que actualmente es utilizado para riego de áreas verdes dentro del recinto y sectores aledaños, configurándose como una experiencia concreta de reúso de aguas servidas tratadas a escala local.

Proyección de demanda de aguas servidas dentro del territorio operacional de Calama, período 2021–2036

AGUAS SERVIDAS DOMESTICAS														Q Infilt (l/s)	Q A Lluv (l/s)	TOTAL		Carga Proy Domestica kgDBO5/día
Año	Año	Población Total AP	Cobertura AS	Población Saneada AS	Clientes AS	Dotación		Coeficiente de recuperación=			0,87	Consumo AS				Q medio Total	Qmax horario	
						m3/cliente/mes	l/hab/día	Q medio	Modelo a utilizar	Coef Harmon	Qmax Horario							
		Hab	%	Hab	Clientes			l/s			l/s	(m3)				l/s	l/s	
2021	0	153.226	99,48%	152.423	49.779	16,5	177,0	271,7	Harmon	1,86	504,4	9.849.393	19,50	0		291,2	523,9	7.697
2022	1	154.227	99,49%	153.434	50.743	16,5	179,9	277,9	Harmon	1,85	515,3	10.073.631	19,50	0		297,4	534,8	7.748
2023	2	155.186	99,50%	154.404	51.707	16,6	182,8	284,2	Harmon	1,85	526,4	10.301.788	19,50	0		303,7	545,9	7.797
2024	3	156.105	99,51%	155.332	52.671	16,7	185,8	290,6	Harmon	1,85	537,7	10.533.978	19,50	0		310,1	557,2	7.844
2025	4	156.982	99,51%	156.219	53.635	16,7	188,9	297,1	Harmon	1,85	549,3	10.770.311	19,50	0		316,6	568,8	7.889
2026	5	157.817	99,52%	157.065	54.599	16,8	192,1	303,8	Harmon	1,85	561,0	11.010.902	19,50	0		323,3	580,5	7.932
2027	6	158.612	99,53%	157.870	55.563	16,9	195,3	310,5	Harmon	1,85	573,0	11.255.861	19,50	0		330,0	592,5	7.972
2028	7	159.365	99,54%	158.632	56.527	17,0	198,7	317,4	Harmon	1,84	585,2	11.505.303	19,50	0		336,9	604,7	8.011
2029	8	160.077	99,55%	159.353	57.491	17,0	202,2	324,4	Harmon	1,84	597,6	11.759.341	19,50	0		343,9	617,1	8.047
2030	9	160.748	99,56%	160.034	58.455	17,1	205,7	331,5	Harmon	1,84	610,3	12.018.089	19,50	0		351,0	629,8	8.082
2031	10	161.378	99,56%	160.672	59.419	17,2	209,4	338,8	Harmon	1,84	623,3	12.281.661	19,50	0		358,3	642,8	8.114
2032	11	161.966	99,57%	161.269	60.383	17,3	213,2	346,2	Harmon	1,84	636,5	12.550.173	19,50	0		365,7	656,0	8.144
2033	12	162.513	99,58%	161.824	61.347	17,4	217,1	353,8	Harmon	1,84	650,0	12.823.742	19,50	0		373,3	669,5	8.172
2034	13	163.060	99,58%	162.369	62.335	17,5	221,0	361,3	Harmon	1,84	663,5	13.098.058	19,50	0		380,8	683,0	8.200
2035	14	163.609	99,58%	162.915	63.310	17,6	225,0	369,1	Harmon	1,84	677,3	13.378.241	19,50	0		388,6	696,8	8.227
2036	15	164.159	99,58%	163.464	64.300	17,7	229,0	377,0	Harmon	1,83	691,4	13.664.418	19,50	0		396,5	710,9	8.255

Fuente: *TRATACAL S.A., Actualización Plan de Desarrollo 2021–2036, Cuadro 4.4.b, Proyección de Demanda de Aguas Servidas dentro del Territorio Operacional Calama.*

Desde una perspectiva de Balance Hídrico, el sistema de tratamiento presenta una demanda acotada, asociada a una localidad de baja escala. La proyección de demanda considera además el crecimiento futuro por la incorporación de 32 viviendas, estimándose un caudal medio diario de 1,0 l/s y un caudal máximo puntual de 1,55 l/s.

I. **Caudal medio de aguas servidas:** El sistema considera un caudal medio diario proyectado de 1,0 l/s, correspondiente a las aguas servidas domiciliarias generadas por el sector de San Pedro de Coloso. Este caudal representa la oferta base de aguas servidas tratadas para reúso disponible, principalmente en riego de áreas verdes dentro del recinto y sectores aledaños.

II. **Caudal máximo puntual:** Se estima un caudal máximo de 1,55 l/s, valor que representa una condición de mayor exigencia hidráulica esperada para el sistema. Esta demanda máxima sigue siendo reducida en comparación con la capacidad instalada de impulsión, lo que permite identificar una condición operacional favorable desde el punto de vista hidráulico.

III. **Capacidad de elevación:** La planta elevadora ubicada en el borde costero recibe la totalidad de las aguas servidas del sector y las impulsa hacia la PTAS mediante una tubería de HDPE de 200 mm. La PEAS cuenta con dos bombas

en configuración 1+1, cada una con capacidad de 10 l/s, por lo que la capacidad instalada supera ampliamente el caudal máximo puntual proyectado de 1,55 l/s.

IV. **Tratamiento y acumulación de agua tratada:** La PTAS responde a un sistema de lombrifiltro, que trata la totalidad de las aguas domiciliarias. El efluente tratado es conducido a un estanque enterrado de acumulación de 50 m³, desde donde actualmente se utiliza para el riego de áreas verdes dentro del recinto. Esta condición permite que el agua tratada no sea concebida únicamente como descarga, si no como un recurso disponible para reúso local.

V. **Disposición y reúso del efluente:** Originalmente, la descarga de la PTAS consideraba una aducción de HDPE 200 mm para conducir los excedentes hacia el sector bajo y disponerlos mediante un emisario submarino, sin embargo, dicha obra no se materializó debido a superposiciones de concesiones marítimas. Se plantea la posibilidad de habilitar un pilón para entregar aguas servidas tratadas a camiones destinados a riego u otros usos similares, previa obtención de los permisos correspondientes.

VI. **Condición Operacional del Balance:** En síntesis, el balance hídrico muestra una demanda de tratamiento baja, una capacidad de elevación ampliamente superior a la demanda máxima y una disponibilidad de agua tratada cercana al caudal medio de **1,0 l/s** para fines de reúso. La principal oportunidad del sistema se encuentra en formalizar y ampliar el aprovechamiento del efluente tratado, mediante control de volúmenes, identificación de receptores y definición de usos autorizados.

En este contexto, el reúso de las aguas servidas tratadas provenientes de la PTAS San Pedro de Coloso adquiere una importancia estratégica, dado que permite transformar un efluente sanitario en un recurso hídrico útil para una localidad inserta en una zona de alta escasez hídrica. Al tratar 100% de las aguas domiciliarias del sector y destinar el efluente a riego, esta planta demuestra una aplicación concreta de economía circular del agua a pequeña escala. Asimismo, su operación permite visualizar oportunidades de ampliación del reúso mediante entregas controladas a terceros, siempre bajo condiciones de autorización, trazabilidad de volúmenes, identificación del receptor y cumplimiento normativo. De esta forma, la experiencia de San Pedro de Coloso constituye un antecedente relevante para evaluar modelos replicables de reúso descentralizado en localidades menores de la Región de Antofagasta.

- **Levantamiento y análisis referente al reúso de AST en la Región de Antofagasta.**

En base al levantamiento y análisis referentes al reúso de AST, implementadas o evaluadas por actores privados en la Región de Antofagasta y en contextos territoriales similares. Esta revisión permitió complementar el análisis documental formativo desarrollado en las actividades anteriores, incorporando evidencia empírica sobre proyectos, iniciativas y casos

donde el agua tratada ha sido considerada para usos productivos, industriales, mineros, agrícolas ambientales o internos de operación. A partir de los antecedentes recopilados fue posible caracterizar las principales condiciones de implementación de estas experiencias, considerado el tipo de uso del agua reutilizada, el nivel de tratamiento aplicado, las condiciones técnicas y operacionales, las barreras normativas identificadas, los mecanismos de gestión y coordinación utilizados, así como los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas. De esta manera, la actividad permitió reconocer patrones, buenas prácticas y limitaciones relevantes para orientar el análisis de viabilidad.

Previo al análisis se sistematizaron los principales antecedentes operacionales de plantas de tratamiento y sistemas de disposición existentes en la Región de Antofagasta. Esta revisión consideró información sostenida en resoluciones, oficios y programas de monitoreo extraídos de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), incorporando variables como tipo de tratamiento, procesos unitarios, destino del efluente, caudales de diseño u operación, volúmenes tratados, cargas contaminantes, línea de lodos, exigencias de monitoreo y observaciones relevantes para la continuidad y calidad del servicio. La Tabla detalla la caracterización y los parámetros operacionales clave de los nueve sistemas sanitarios y de disposición evaluados en la Región de Antofagasta.

Antecedentes operacionales de plantas y sistemas de tratamiento revisados en la Región de Antofagasta

Planta / sistema/ Titular	Tipo de tratamiento y procesos principales	Datos operacionales relevantes	Destino del efluente / observaciones para reúso
PTAS Antofagasta — Lodos Activados/ ECONSSA Chile S.A.	Tratamiento secundario mediante lodos activados. Incluye pretratamiento, tratamiento primario, reactores biológicos, sedimentadores, desinfección, piscina de acumulación, estanque Grandón y conducción posterior.	Caudal medio actual: **95 l/s**; caudal medio de diseño: **120 l/s**. Caudal máximo día actual: **9.504 m³/d**. DBO5 actual: **1.888 kg/d**; SST actual: **2.873 kg/d**. Genera aprox. **18 ton/mes de lodos en base seca**.	Efluente impulsado hacia estanque Grandón y luego a estanque Salar del Carmen, asociado a **uso industrial/minero**. Es uno de los sistemas más relevantes para analizar reúso productivo en Antofagasta.
Emisario Submarino Antofagasta / Pretratamiento/ECONSSA Chile S.A.	Sistema de pretratamiento y emisario submarino. Considera medición de caudal, rejas, desarenador y desgrasador.	Caudal máximo puntual de diseño: **1.070 l/s**. Caudal máximo día: **92.488 m³/d**. Población de tratamiento: **40.190 hab.** Emisario de **970 m**, con dos difusores de 40 m.	Descarga al mar. Su potencial de reúso requiere evaluar tratamiento adicional, dado que corresponde principalmente a pretratamiento antes de disposición marina.

PTAS Baquedano/Aguas Antofagasta S.A.	Tratamiento secundario mediante lodos activados convencional. Incluye reja fina, desarenador, aireación, sedimentadores, desinfección con hipoclorito y línea de lodos.	Caudal medio mensual: **3,88 l/s**. Caudal máximo día: **502 m³/d**. Volumen tratado: **10.057 m³/mes**. DBO5: **100 kg/d**; SST: **100 kg/d**; N total: **25 kg/d**; P total: **5 kg/d**.	Efluente destinado a terreno / áreas verdes municipales para **riego**, debiendo cumplir requisitos de la **NCh 1.333/78**. Caso relevante para reúso urbano-local en zonas áridas.
PTAS Calama/Tratacal S.A.	Tratamiento secundario mediante lodos activados convencional. Incluye PEAS, rejas, desarenadores, aireación, sedimentadores, desinfección con gas cloro, línea de lodos, biofiltro y mitigación de olores.	Caudal medio mensual: **266 l/s**. Caudal máximo día: **31.845 m³/d**. Volumen tratado: **689.472 m³/mes**. Capacidad orgánica: **91,3%**; capacidad hidráulica: **117,4%**. Producción de lodos: **1.772,54 ton/año**.	Descarga a Quebrada Quetena. Presenta alta escala operacional y presión hidráulica relevante, por lo que su eventual reúso requiere evaluar capacidad, calidad, infraestructura y restricciones normativas.
PTAS Coloso/ECONSSA Chile S.A.	Sistema tipo **lombrifiltro**, con programa de monitoreo provisorio.	No se informan caudales de diseño en el oficio revisado. Se exige control de DBO5, SST, NTK, fósforo, aceites y grasas, coliformes fecales, cloro residual, pH, caudales y volumen de descarga mensual.	Efluente dispuesto en **riego**. El programa provisorio surge por incumplimientos de autocontrol, por lo que es relevante para analizar riesgos operacionales y necesidad de monitoreo permanente.
Emisario Submarino Mejillones / Pretratamiento	Sistema de pretratamiento y emisario submarino. Incluye medición de caudal, reja gruesa, reja fina, desarenador y desgrasador.	Caudal medio actual: **18 l/s**; diseño: **26,6 l/s**. Caudal máximo día actual: **2.189 m³/d**; diseño: **6.541 m³/d**. Población actual: **9.972 hab.**; diseño: **13.140 hab.**	Descarga al mar. Su reúso requeriría incorporar tratamiento secundario o terciario, considerando que actualmente corresponde a pretratamiento asociado a disposición marina.
PTAS Sierra Gorda/Aguas Antofagasta S.A.	Tratamiento secundario mediante lodos activados convencional. Incluye reja gruesa, desarenador, desgrasador, aireación, sedimentadores, desinfección con hipoclorito y línea de lodos.	Caudal medio mensual: **5,3 l/s**. Caudal máximo día: **445 m³/d**. Volumen tratado: **13.738 m³/mes**. DBO5: **95 kg/d**; SST: **97 kg/d**; N total: **54 kg/d**; P total: **11 kg/d**.	Efluente destinado a terreno / áreas verdes municipales para **riego**, debiendo cumplir requisitos de la **NCh 1.333/78**. Caso útil para analizar reúso local en localidades pequeñas.

Emisario Submarino Taltal / Pretratamiento	Sistema de pretratamiento y emisario submarino. Incluye medición de caudal, rejas, desarenador y desgrasador.	Caudal medio actual: **20 l/s**; diseño: **22,3 l/s**. Caudal máximo día actual: **2.431 m³/d**; diseño: **5.936 m³/d**. Población actual: **10.435 hab.**; diseño: **15.512 hab.**	Descarga al mar. Presenta potencial condicionado a la incorporación de tratamiento adicional y a la factibilidad de conducción hacia usuarios potenciales.
Emisario Submarino Tocopilla / Pretratamiento/Aguas de Antofagasta S.A.	Sistema de pretratamiento y emisario submarino. Incluye medición de caudal, reja gruesa, reja fina, desarenador y desgrasador.	Caudal medio actual: **38,35 l/s**; diseño: **62 l/s**. Caudal máximo día actual: **3.854 m³/d**; diseño: **13.227 m³/d**. Población actual: **24.872 hab.**; diseño: **28.953 hab.**	Descarga al mar. Su potencial de reúso depende de evaluar tratamiento complementario, demanda cercana e infraestructura de impulsión o conducción.

Fuente: *elaboración propia, con base en resoluciones exentas, oficios y programas de monitoreo extraídos de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), correspondientes a sistemas de tratamiento y disposición de aguas servidas de la Región de Antofagasta.*

La tabla permite visualizar de manera integrada las diferencias entre sistemas con tratamiento biológico secundario, sistemas de pretratamiento asociados a emisarios submarinos y experiencias donde el efluente tratado se vincula a usos como riego, uso industrial o minero. Los antecedentes constituyen una base técnica inicial para identificar el potencial de reúso de AST, sus limitaciones operacionales y las condiciones mínimas que deben evaluarse para su aplicación en la segunda región.

B2. Barreras normativas y regulatorias

- **Barrera asociada a la titularidad y disposición del efluente tratado.**

La falta de certeza respecto de quien tiene la facultad jurídica para disponer del efluente tratado origina la discusión de las aguas servidas que provienen de aguas previamente captadas, potabilizadas, distribuidas, utilizadas por los usuarios, recolectadas por el sistema de alcantarillado y posteriormente tratadas por la empresa sanitaria. Sin embargo, una vez tratadas, no existe una norma específica que regule de manera expresa y definitiva su dominio, propiedad, disposición, venta o cesión a terceros.

Esta situación ha generado interpretaciones distintas en el tiempo. Por una parte, se ha sostenido que mientras las aguas servidas tratadas no sean abandonadas o descargadas en un cauce natural, artificial o en el mar, el prestador sanitario podría mantener facultades de disposición sobre ellas. Por otra, la interpretación administrativa venda o ceda estas aguas si dicha actividad no se encuentra expresamente considerada dentro del respectivo título concesional o dentro de su objetivo sanitario. Esta definición genera incertidumbre para los proyectos de reúso, especialmente cuando se pretende establecer contratos de suministro con terceros, tales como empresas mineras, industrias, municipios o agricultores.

Esta barrera es central porque afecta directamente la posibilidad de estructurar modelos de negocio y de inversión. Sin certeza jurídica sobre la facultad de disponer del efluente tratado, los potenciales usuarios no cuentan con seguridad suficiente para comprometer inversiones en conducción, almacenamiento, tratamiento adicional o adaptación de procesos productivos. Asimismo, las empresas sanitarias enfrentan incertidumbre respecto de si pueden comercializar el efluente, en qué condiciones, con qué autorizaciones y si los ingresos obtenidos deben o no ser considerados en la estructura tarifaria del servicio sanitario.

- **Barrera vinculada a derechos de aprovechamiento de aguas y usuarios aguas abajo.**

Una segunda barrera relevante corresponde a la interacción entre el reúso y las aguas servidas tratadas y los derechos de aprovechamiento de aguas existentes aguas debajo de los puntos de descarga. Esta barrera se presenta principalmente en los casos en que las plantas de tratamiento descarguen sus efluentes en causes superficiales continentales. En estos casos, las aguas servidas tratadas pueden haberse incorporado de hecho a los balances hídricos de la cuenca, siendo utilizadas directa o indirectamente por titulares de derechos de aprovechamiento, usuarios agrícolas, comunidades o ecosistemas aguas abajo. Por esta razón, el reúso directo de efluentes que actualmente son descargados en cauces continentales no siempre representa una eficiencia neta inmediata, dado que puede reducir caudales disponibles para otros usuarios o alterar condiciones ambientales del cuerpo receptor. Esta situación obliga a realizar estudios caso a caso, incorporando balances hídricos, identificación de derechos de aprovechamiento constituidos o reconocidos, usos mínimos, caudales ecológicos y efectos acumulativos en la cuenca.

La barrera se expresa, entonces, en la ausencia de información oficial, completa y actualizada sobre derechos y usos existentes aguas debajo de las descargas. Sin esta información, resulta difícil determinar que volúmenes podrían ser efectivamente reutilizados sin afectar derechos de terceros o sin generar conflictos. En el caso de Antofagasta, esta dificultad es especialmente relevante para los sistemas interiores como Calama, Baquedano o Sierra Gorda, donde el análisis debe considerar si el efluente es descargado a terreno, cauce, áreas verdes o sistemas de infiltración, y si existen usos posteriores asociados al recurso.

- **Barrera asociada a autorizaciones, permisos y evaluación ambiental**

Los proyectos de reúso de AST pueden requerir una combinación de autorizaciones sectoriales sanitarias, ambientales, marítimas, hidráulicas y municipales, dependiendo del origen del efluente, el tipo de tratamiento, el uso final, el punto de entrega, la infraestructura requerida y la eventual afectación de terceros. Esta multiplicidad de permisos genera una barrera relevante, especialmente cuando no existe una ventanilla única ni un procedimiento específico para proyectos de reúso de AST.

En términos generales, los proyectos pueden requerir revisión por parte de la SISS cuando se relacionan con infraestructura sanitaria concesionada; autorización sanitaria si existe riesgo de exposición humana o uso en riego de áreas verdes; evaluación ambiental si se construyen nuevas plantas, impulsiones, emisarios, estanques o sistemas de disposición; intervención de DIRECTEMAR cuando existen descargas, obras de infraestructura en zona costera; y pronunciamientos de la DGA cuando el proyecto se relaciona con cauces, infiltración, recarga de acuíferos o derechos de aprovechamiento.

La experiencia de Antofagasta muestra esta dificultad con claridad. El estudio desarrollado para ECONSSA analizó alternativas de tratamiento centralizado, tratamiento descentralizado, riego urbano, venta al sector industrial La Negra y venta a minería, sin embargo, también identificó que futuros proyectos deben compatibilizarse con la legislación sanitaria vigente y cumplir con los requerimientos del Sistema de Evaluación del Impacto Ambiental. Además, se observaron objeciones de servicios públicos respecto de alternativas descentralizadas, principalmente por la complejidad de operación, mantención de instalaciones, manejo de lodos, generación de olores y eventuales riesgos sanitarios. En la Tabla se detallan los pronunciamientos, concesiones marítimas y resoluciones de la Gobernación Marítima que regula la disposición final y la Zona de Protección Litoral en los sistemas costeros.

Tabla. Gobernación Marítima

Permisos y Aprobaciones Sectoriales Solicitados por Econssa para el Proyecto de Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de 300 l/s

Esta otra tabla sintetiza las resoluciones sanitarias otorgadas por el Servicio de Salud de Antofagasta, las cuales certifican la puesta en marcha y la aprobación operacional del sistema de saneamiento.

Tabla. Servicio de Salud de Antofagasta

RESS Nº095	Autoriza puesta en marcha y operación PTAS
RESS Nº2229	Aprueba proyecto de Saneamiento Costero

En esta tabla se presentan las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) aprobadas por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) que respaldan las obras de impulsión, ampliación y mejoramiento del sistema de tratamiento.

Tabla. Servicio de Evaluación Ambiental (SEA)

Ord GMA 12600/61	Aprueba informe de Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental del proyecto Disposición final del Alcantarillado de la ciudad de Antofagasta
Decreto GMA Nº271/09	Decreto de concesión marina
Decreto GMA Nº214/98	Decreto de concesión marina
Ord GMA 12600/1196	Fija Zona de Protección Litoral
RCA Nº209	Sistema de Impulsión - Aducción Estanque Grandón a Fundición Altonorte, aprobada en septiembre del año 2001, cuyo titular es Sacyr Agua Norte.
RCA Nº230	Ampliación del sistema de disposición final de Aguas Servidas de Antofagasta, aprobada en abril del año 2014.
RCA Nº12	Aumento de la capacidad de manejo de las Aguas Servidas de Antofagasta, aprobada en enero de 2016.
RCA N°0310	Nueva Planta de Tratamiento de Agua Servidas para reúso de Antofagasta, aprobada en diciembre de 2020.
RCA N°0307	Actualización del método constructivo del emisario submarino del sistema de disposición final de aguas servidas de Antofagasta, aprobada en agosto de 2021.
RCA N°20220200115	Mejoras al sistema de disposición final de aguas servidas de Antofagasta, aprobada en enero de 2022

La Figura presenta la localización de las principales obras asociadas al sistema de tratamiento y disposición de aguas servidas en Antofagasta, permitiendo visualizar su distribución territorial y la relación con la infraestructura existente.

Figura Obras de ECONSSA aprodas ambientalmente en Antofagasta,



- **Barrera asociada a criterios de calidad del efluente tratado**

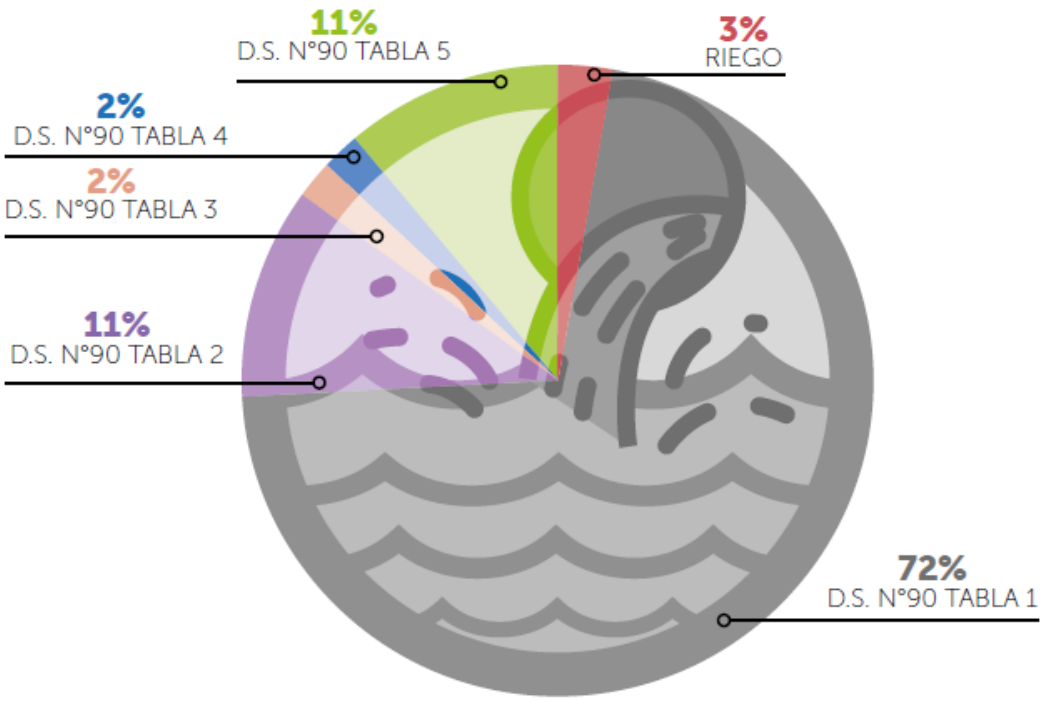
Otra dificultad central corresponde a la inexistencia de una norma chilena especifica que establezca estándares de calidad de aguas servidas tratadas según tipo de reúso. Actualmente, el tratamiento de aguas servidas tratadas se regula principalmente en función del punto de descarga y del cuerpo receptor, mediante normas de emisión como el D.S. N°90/00 para aguas marinas y continentales superficiales, y el D.S. N°46/02 para aguas subterráneas. Sin embargo, estas normas están diseñadas para regular descargas, no para definir calidades de reúso.

Esta diferencia es fundamental. Un efluente puede cumplir con la normativa de descarga y, aun así, no ser apto para riego, uso urbano, uso industrial, uso minero, recarga de acuíferos o uso ambiental sin tratamiento adicional. En el caso de emisarios submarinos, el estándar vigente permite cumplir con disposición marina mediante tratamiento primario o pretratamiento físico, pero no necesariamente entrega un agua con calidad suficiente para reúso. Por ello, imponer tratamiento secundario a una parte de las aguas descargadas al mar no garantiza su reutilización si no existe demanda, infraestructura de conducción, capacidad de pago o criterios de calidad asociados al uso final.

La norma NCh 1333, relativa a requisitos de calidad del agua para diferentes usos, puede servir como referencia para riego u otros usos, pero no constituye una norma integral de reúso de AST. Además, se trata de una norma antigua, cuya última modificación data de 1987, lo que limita su capacidad para abordar contaminantes emergentes, riesgos microbiológicos, usos urbanos no potables, exposición pública o requerimientos específicos

de industrias modernas. Esta brecha normativa obliga a que cada proyecto defina criterios caso a caso, aumentando la incertidumbre técnica y regulatoria. La figura muestra la distribución de los principales marcos normativos aplicados a los sistemas de tratamiento y disposición, evidenciando la predominancia del D.S. N°90 y la diversidad de criterios según tipo de descarga.

Figura Distribución normativa aplicada a los sistemas de tratamiento de aguas servidas



Fuente: *Informe de Gestión del Sector Sanitario, SISS 2022.*

- **Barrera operacional: responsabilidades de operación, mantención y control**

La implementación requiere definir claramente quien será responsable de operar, mantener y controlar cada componente del sistema: planta de tratamiento, tratamiento adicional, desinfección, conducción, almacenamiento, puntos de entrega, redes de distribución, control de calidad, retiro de lodos, gestión de olores y respuesta ante contingencias. Cuando estas responsabilidades no están claramente asignadas, aumenta el riesgo operacional y disminuye la confianza de los usuarios y autoridades.

Esta barrera se observa especialmente en proyectos descentralizados o de menor escala, donde pueden existir múltiples puntos de tratamiento y entrega. En Antofagasta se identificaron alternativas de tratamiento descentralizado para riego urbano e industrial, pero también se advirtió que algunos servicios públicos presentaron objeciones asociadas a la complejidad de mantención, control de lodos y generación de olores. Esto evidencia que el

reúso no puede evaluarse únicamente por la disponibilidad de caudal, sino también por la capacidad de operación sostenida, monitoreo permanente y gestión de impactos.

En sistemas rurales o localidades menores, esta barrera se intensifica por limitaciones de financiamiento, tecnologías inadecuadas o mal dimensionamiento de soluciones. La Submesa de reúso identificó que muchas localidades rurales con tratamiento de aguas servidas tienen dificultades para descargar efluentes cumpliendo la normativa, principalmente por problemas de operación y mantenimiento. Por lo tanto, cualquier propuesta de reúso en estos contextos debe ser local, gradual y proporcional a la capacidad real de operación.

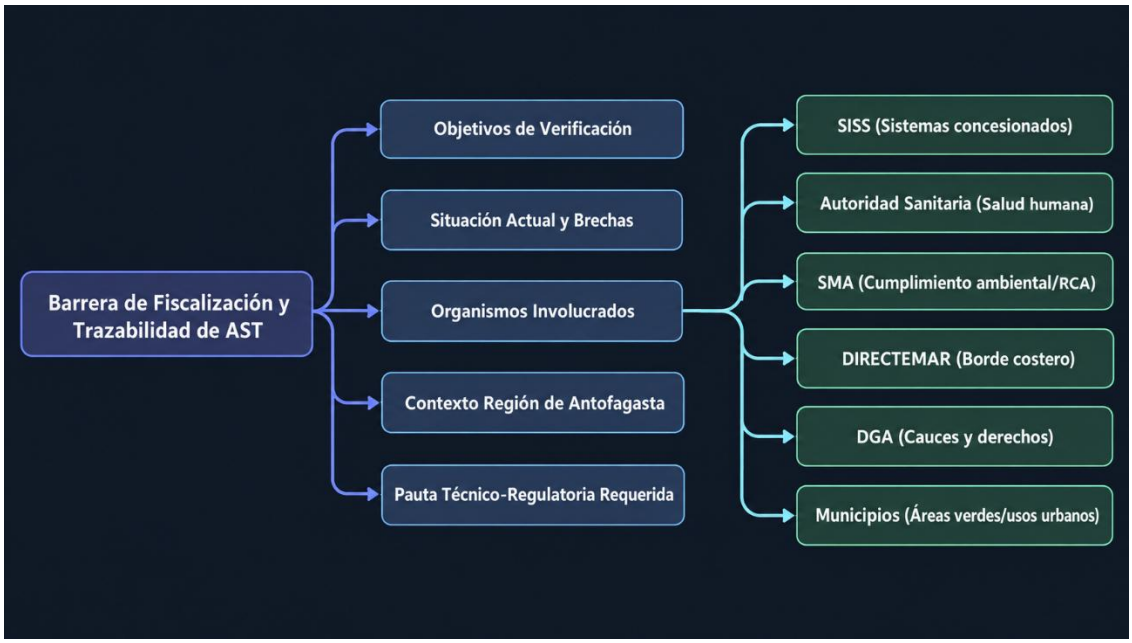
- **Barrera de Fiscalización y Trazabilidad**

El reúso de AST requiere mecanismos de fiscalización y trazabilidad que permitan verificar el origen del efluente, el nivel de tratamiento, la calidad del agua entregada, el volumen reutilizado, el uso final y el cumplimiento de condiciones sanitarias y ambientales. Actualmente, la fiscalización del sector sanitario está estructurada principalmente en torno al cumplimiento de descarga, calidad de servicio y programas de monitoreo, pero no existe un sistema especifico y homogéneo para controlar proyectos de reúso directo.

Esta brecha genera incertidumbre respecto de qué organismo debe fiscalizar cada etapa. La SISS tiene competencia sobre empresas sanitarias y sistemas concesionados; la autoridad sanitaria se vincula con riesgos para la salud humana; la SMA puede intervenir si existe una RCA o incumplimiento ambiental; DIRECTEMAR tiene competencias sobre el borde costero y descargas marítimas; la DGA puede intervenir en materias de cauces, derechos o recarga; los Municipios pueden participar en áreas verdes o usos urbanos. La ausencia de un marco integrado puede generar superposición de competencias o vacíos de control.

Para la Región de Antofagasta, esta barrera es especialmente importante porque el reúso puede involucrar simultáneamente a empresas sanitarias, operadores de tratamiento, usuarios mineros o industriales, municipios, infraestructura de conducción, puntos de entrega fuera del recinto sanitario y exigencias de calidad diferenciadas. Por ello se requiere una pauta Técnico-Regulatoria que defina responsabilidades, parámetros mínimos, frecuencias de monitoreo, trazabilidad de volúmenes, reporte de información y coordinación interinstitucional. La Figura 16 sintetiza los principales organismos vinculados a la fiscalización y trazabilidad del reúso, evidenciando la distribución de competencias y la necesidad de coordinación entre las distintas entidades involucradas.

Figura Mapa mental de las instituciones fiscalizadoras



Fuente: elaboración propia con apoyo de IA (OpenAI, 2026).

- **Barrera tarifaria, económica y de modelo de negocio**

El reúso exige inversiones en tratamiento adicional, impulsiones, estanques, redes, equipos de desinfección, control de calidad, energía, operación y mantenimiento. Estas inversiones pueden ser significativas, especialmente cuando se busca recuperar aguas descargadas al mar mediante emisarios submarinos o conducir efluentes hacia usuarios alejados, como sectores industriales o mineros.

La barrera económica consiste en determinar quién financia dichas inversiones: la empresa sanitaria, el usuario final, el Estado, un modelo mixto o un tercero operador. Si los costos se incorporan directamente a la tarifa sanitaria, podrían ser pagados por usuarios residenciales que no necesariamente reciben un beneficio directo del reúso. En cambio, si el costo se asigna al usuario productivo que demanda el agua tratada, se requiere un modelo contractual estable, certeza sobre disponibilidad y calidad, y reglas claras sobre el precio, propiedad y continuidad de suministro.

La experiencia de Antofagasta muestra que existe una demanda potencial para uso industrial, minero y riego urbano, en este caso la SISS promueve modelos de negocio donde los beneficiarios de la reutilización financien los proyectos de tratamiento secundario necesarios. El objetivo de esta estrategia es:

I. **Prevenir incrementos en las tarifas habitacionales,** al ser la industria la que asume el costo de inversión y operación de la infraestructura.
II. **Alternativa a la inversión obligatoria,** en caso de que se imponga un tratamiento secundario generalizado a las descargas, sin un comprador directo que asuma el costo, las tarifas para los hogares podrían subir un 30% y un 50% debido a los mayores costos de energía e inversión.

Las Bases Preliminares para el Estudio Tarifario 2026-2031 de la SISS, establece el marco regulatorio y metodológico para fijar los precios de los servicios sanitarios en la Región de Antofagasta, detallando los aspectos clave respecto a la fijación de tarifas para las Plantas de Tratamiento de AST:

I. **Modelo de Empresa Eficiente**: las tarifas no se basan en costos históricos, sino en una “empresa modelo” que inicia su operación desde cero. Esta debe diseñar, dimensionar y valorizar sus soluciones tecnológicas buscando la máxima eficiencia técnica y económica para satisfacer la demanda de autofinanciamiento. La tarifa se desglosa en cuatro etapas, siendo la de disposición de AST la que contempla la operación de la PTAS.

II. **Estructura de Cargos para Tratamiento:** Para etapa de disposición, se determinan específicamente los cargos por disposición Base, cargo Adicional por Tratamiento y Factor de Descuento por Reúso.

ANEXO C. ANTECEDENTES NORMATIVOS DE CALIDAD Y DESCARGA

C1. Límites máximos permisibles para descargas a cuerpos fluviales sin capacidad de dilución del cuerpo receptor, según D.S. N°90/2000.

N°	Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
1	Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
2	Aluminio	mg/L	Al	5
3	Arsénico	mg/L	As	0,5
4	Boro	mg/L	B	0,75
5	Cadmio	mg/L	Cd	0,01
6	Cianuro	mg/L	CN-	0,2
7	Cloruros	mg/L	Cl-	400
8	Cobre Total	mg/L	Cu	1
9	Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000
10	Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
11	Cromo Hexavalente	mg/L	Cr+6	0,05
12	DBO5	mg O_2/L	DBO5	35*
13	Fósforo	mg/L	P	10
14	Fluoruro	mg/L	F-	1,5
15	Hidrocarburos Fijos	mg/L	HF	10
16	Hierro Disuelto	mg/L	Fe	5
17	Manganeso	mg/L	Mn	0,3
18	Mercurio	mg/L	Hg	0,001
19	Molibdeno	mg/L	Mo	1
20	Níquel	mg/L	Ni	0,2
21	Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
22	Pentacloro fenol	mg/L	C6OHCl5	0,009
23	pH	Unidad	pH	6,0 - 8,5
24	Plomo	mg/L	Pb	5
25	Poder Espumógeno	mm	PE	7
26	Selenio	mg/L	Se	1
27	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80*
28	Sulfatos	mg/L	$SO4^{2-}$	1000
29	Sulfuro	mg/L	S^{2-}	1
30	Temperatura	°C	T°	35
31	Tetracloroeteno	mg/L	C2Cl4	4
32	Tolueno	mg/L	C6H5CH3	7
33	Triclorometano	mg/L	CHCl3	2
34	Xileno	mg/L	C6H4C2H6	5
35	Zinc	mg/L	Zn	3

Fuente: *Elaboración propia a partir de la Tabla N°1 del D.S. N°90/2000, correspondiente a descargas de residuos líquidos a cuerpos fluviales sin capacidad de dilución del cuerpo receptor.*

C2. Límites máximos permisibles para descargas a cuerpos fluviales con capacidad de dilución del cuerpo receptor, según D.S. N°90/2000,

N°	Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
1	Aceites y Grasas	mg/L	A y G	50
2	Aluminio	mg/L	Al	10
3	Arsénico	mg/L	As	1
4	Boro	mg/L	B	3
5	Cadmio	mg/L	Cd	3
6	Cianuro	mg/L	CN-	1
7	Cloruros	mg/L	Cl-	2000
8	Cobre Total	mg/L	Cu	3
9	Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000
10	Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	1
11	Cromo Hexavalente	mg/L	Cr+6	2
12	DBO5	mg O_2/L	DBO5	300
13	Fósforo	mg/L	P	5
14	Fluoruro	mg/L	F-	15
15	Hidrocarburos Fijos	mg/L	HF	50
16	Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10
17	Manganeso	mg/L	Mn	3
18	Mercurio	mg/L	Hg	1
19	Molibdeno	mg/L	Mo	25
20	Níquel	mg/L	Ni	3
21	Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	75
22	Pentacloro fenol	mg/L	C6OHCl5	1
23	pH	Unidad	pH	6,0 - 8,5
24	Plomo	mg/L	Pb	5
25	Poder Espumógeno	mm	PE	7
26	Selenio	mg/L	Se	0,1
27	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	300
28	Sulfatos	mg/L	$SO4^{2}$-	2000
29	Sulfuro	mg/L	S^{2}-	10
30	Temperatura	°C	T°	40
31	Tetracloroeteno	mg/L	C2Cl4	4
32	Tolueno	mg/L	C6H5CH3	7
33	Triclorometano	mg/L	CHCl3	5
34	Xileno	mg/L	C6H4C2H6	5
35	Zinc	mg/L	Zn	20

Fuente: *Elaboración propia a partir de la Tabla N°2 del D.S. N°90/2000, correspondiente a descargas de residuos líquidos a cuerpos fluviales con capacidad de dilución del cuerpo receptor.*

C3. Límites máximos permisibles para descargas a lagos, según D.S. N°90/2000, Tabla N°3

N°	Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
1	Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
2	Aluminio	mg/L	Al	1
3	Arsénico	mg/L	As	0,1
4	Cadmio	mg/L	Cd	0,02
5	Cianuro	mg/L	CN-	0,5
6	Cobre Total	mg/L	Cu	0,1
7	Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000-70
8	Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
9	Cromo Hexavalente	mg/L	Cr+6	0,2
10	Cromo Total	mg/L	Cr Total	2,5
11	DBO5	mg O_2/L	DBO5	35
12	Estaño	mg/L	Sn	0,5
13	Fluoruro	mg/L	F-	1
14	Fósforo	mg/L	P	2
15	Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	5
16	Hierro Disuelto	mg/L	Fe	2
17	Manganeso	mg/L	Mn	0,5
18	Mercurio	mg/L	Hg	0,005
19	Molibdeno	mg/L	Mo	0,07
20	Níquel	mg/L	Ni	0,5
21	Nitrógeno Total **	mg/L	N	10
22	pH	Unidad	pH	6,0 - 8,5
23	Plomo	mg/L	Pb	0,2
24	SAAM	mm	SAAM	10
25	Selenio	mg/L	Se	0,01
26	Sólidos Sedimentables	mg/L/h	SSED	5
27	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80
28	Sulfatos	mg/L	$SO4^{2}$-	1000
29	Sulfuro	mg/L	S2-	1
30	Temperatura	°C	T°	30
31	Zinc	mg/L	Zn	5

Fuente: *Elaboración propia a partir de la Tabla N°3 del D.S. N°90/2000, correspondiente a descargas de residuos líquidos a lagos.*

C4. Límites máximos permisibles para descargas a medio marino dentro de la Zona de Protección Litoral, según D.S. N°90/2000

N°	Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
1	Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
2	Aluminio	mg/L	Al	1
3	Arsénico	mg/L	As	2
4	Cadmio	mg/L	Cd	2
5	Cianuro	mg/L	CN-	5
6	Cobre	mg/L	Cu	1
7	Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000-70*
8	Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
9	Cromo Hexavalente	mg/L	Cr+6	0,2
10	Cromo Total	mg/L	Cr Total	2,5
11	DBO5	mg O_2/L	DBO5	60
12	Estaño	mg/L	Sn	0,5
13	Fluoruro	mg/L	F-	1,5
14	Fósforo	mg/L	P	5
15	Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	10
16	Hidrocarburos Volátiles	mg/L	HCV	1
17	Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10
18	Manganeso	mg/L	Mn	2
19	Mercurio	mg/L	Hg	0,005
20	Molibdeno	mg/L	Mo	0,1
21	Níquel	mg/L	Ni	2
22	Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
23	pH	Unidad	pH	6,0 - 9,0
24	Plomo	mg/L	Pb	0,2
25	SAAM	mm	SAAM	10
26	Selenio	mg/L	Se	0,01
27	Sólidos Sedimentables	mg/L/h	SSED	5
28	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	100
29	Sulfuro	mg/L	S2-	1
30	Zinc	mg/L	Zn	5
31	Temperatura	°C	T°	30

Fuente: *Elaboración propia a partir de la Tabla N°4 del D.S. N°90/2000, correspondiente a descargas de residuos líquidos a medio marino dentro de la Zona de Protección Litoral.*

C5. Límites máximos permisibles para descarga de residuos líquidos al acuífero, según D.S. N°46

N°	Parámetro	Categoría	Unidad	Ref. D.S. N°46 Tabla 1 Vulnerabilidad media	Ref. D.S. N°46 Tabla 2 Vulnerabilidad baja
1	pH	Indicadores físico-químicos	Unidad	6,0 - 8,5	6,0 - 8,5
2	Cianuro	Inorgánicos	mg/L	0,2	0,2
3	Cloruros	Inorgánicos	mg/L	250	250
4	Fluoruros	Inorgánicos	mg/L	1,5	5
5	N-Nitrato + N-Nitrito	Inorgánicos	mg/L	10	15
6	Sulfatos	Inorgánicos	mg/L	250	500
7	Sulfuros	Inorgánicos	mg/L	1	5
8	Aceites y Grasas	Orgánicos	mg/L	10	10
9	Benceno	Orgánicos	mg/L	0,01	0,01
10	Pentaclorofenol	Orgánicos	mg/L	0,009	0,009
11	Tetracloroeteno	Orgánicos	mg/L	0,04	0,04
12	Tolueno	Orgánicos	mg/L	0,7	0,7
13	Triclorometano	Orgánicos	mg/L	0,2	0,2
14	Xileno	Orgánicos	mg/L	0,5	0,5
15	Aluminio	Metales	mg/L	5	20
16	Arsénico	Metales	mg/L	0,01	0,01
17	Boro	Metales	mg/L	0,75	3
18	Cadmio	Metales	mg/L	0,002	0,002
19	Cobre	Metales	mg/L	1	3
20	Cromo Hexavalente	Metales	mg/L	0,05	0,2
21	Hierro	Metales	mg/L	5	10
22	Manganeso	Metales	mg/L	0,3	2
23	Mercurio	Metales	mg/L	0,001	0,001
24	Molibdeno	Metales	mg/L	1	2,5
25	Níquel	Metales	mg/L	0,2	0,5
26	Plomo	Metales	mg/L	0,05	0,05
27	Selenio	Metales	mg/L	0,01	0,02
28	Zinc	Metales	mg/L	3	20
29	Nitrógeno Total Kjeldahl	Nutrientes	mg/L	10	15

Fuente: *Elaboración propia a partir de la Tabla A.2.7, correspondiente al D.S. N°46, Norma de Emisión de descarga de residuos líquidos al acuífero.*