



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL MANTENIMIENTO DE GRANDES CONDUCCIONES: EL CASO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE ALTO HOSPICIO

Memoria de Título presentada por

Carlos Alberto Campos Suárez

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Alberto Kresse Zamorano

Profesora Correferente
Vivian Aranda Nuñez

Marzo de 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: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL MANTENIMIENTO DE GRANDES CONDUCCIONES: EL CASO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE ALTO HOSPICIO

Nombre del candidato(a): Carlos Alberto Campos Suárez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín

Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 28/10/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/10/2026

Firma:

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

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL MANTENIMIENTO DE GRANDES CONDUCCIONES: EL CASO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE ALTO HOSPICIO

Carlos Campos Suárez, Alberto Kresse Zamorano, Vivian Aranda Nuñez

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

En el norte de Chile, la industria sanitaria utiliza sondajes para el suministro de la población, que enfrentan el desafío de mitigar la presencia de metales en las aguas subterráneas, una problemática común que requiere soluciones adaptadas a las condiciones geotécnicas locales y a las características hidráulicas de cada fuente. En la Región de Tarapacá, específicamente en la Pampa del Tamarugal y zonas cercanas, se observa la presencia de metales como magnesio, arsénico y manganeso, lo que obliga a su tratamiento. En efecto, la empresa “Aguas del Altiplano”, proveedora de los servicios sanitarios en esta región, ha implementado diversos procesos para cumplir con la Norma Chilena NCh409/1.Of.2005 y garantizar agua potable para consumo humano.

Sin embargo, alguno de estos tratamientos, o de los minerales no tratados, debido a que se encuentran en concentraciones menores a las exigibles, generan acumulación en las líneas de conducción, como se observa en la que abastece a Alto Hospicio, donde se ha formado una capa de manganeso adherida a las paredes internas de las tuberías. Este fenómeno genera problemas de calidad del agua cuando las partículas de manganeso se desprenden debido a variaciones en el régimen hidráulico, poniendo en riesgo la infraestructura del sistema por su eventual arrastre.

Este estudio analiza tres alternativas para abordar esta problemática, en distintos puntos y etapas: un sistema de abatimiento de manganeso en la etapa de producción, la instalación de una línea auxiliar que permita realizar mantenimientos sin interrumpir el suministro y la limpieza por tramos con algún método utilizado en la industria.

El análisis considera aspectos técnicos, operativos y económicos para identificar la estrategia más adecuada para este caso en particular, de manera de garantizar la continuidad del servicio y la calidad del agua para los residentes de Alto Hospicio, y propone criterios que podrían ser aplicados en el diseño y operación de otros sistemas de producción con grandes conducciones en el país.

Índice

1	Introducción.....	6
2	Objetivos	7
2.1	Objetivo General	7
2.2	Objetivos Específicos.....	7
3	Antecedentes Generales	8
3.1	Fuentes de agua en Chile	8
3.2	Aguas de la Cuenca de la Pampa del Tamarugal	9
3.3	Sistema de producción y línea de Conducción Canchones	11
3.4	Problemática operacional.....	13
4	Metodología.....	16
4.1	Recopilación y análisis antecedentes	16
4.2	Diseño conceptual de las alternativas de intervención.....	16
4.3	Evaluación de alternativas	17
4.4	Propuesta final	17
5	Análisis de Antecedentes.....	19
5.1	Adherencia de metales en redes de agua.....	19
5.2	Métodos limpieza de redes de agua potable y elección	20
5.3	Métodos de remoción de Manganeseo en aguas.....	22
6	Diseño conceptual de las alternativas de intervención	23
6.1	Sistema de abatimiento de manganeseo en etapa de producción.....	23
6.2	Línea de conducción Paralela	24
6.3	Limpieza por tramos	24
6.4	Diseño de sistema de abatimiento de manganeseo en etapa de producción	25
6.5	Diseño de línea de conducción paralela.....	26
6.6	Diseño para la limpieza por tramos.....	28
7	Evaluación de alternativas.....	30
7.1	Costeo de Alternativas	30
7.1.1	Valorización sistema de abatimiento de manganeseo en etapa de producción	30
7.1.2	Valorización línea de conducción paralela	31
7.1.3	Valorización limpieza por tramos.....	32
7.2	Metodología de evaluación	32
7.3	Evaluación de Alternativas	34
7.3.1	Evaluación sistema de abatimiento de manganeseo en etapa de producción	34
7.3.2	Evaluación de una línea de conducción paralela	34
7.3.3	Evaluación de limpieza por tramos mediante dispositivos <i>pig</i>	35
7.3.4	Comparación de resultados.....	35
8	Propuesta final y conclusiones	37

8.1	Caso Alto Hospicio	37
8.2	Otros escenarios en un sistema de producción de agua	37
9	Referencias	39

1 Introducción

El agua potable puede ser obtenida a partir de diferentes fuentes como ríos, lagos, aguas subterráneas, e incluso el mar. Chile es un país que presenta gran variedad de características climáticas y morfológicas a lo largo de toda su extensión, es por ello que las fuentes cambian de acorde a la zona. En las zonas centro y sur un gran porcentaje es obtenido de ríos y lagos, mientras que, en la zona norte el suministro se realiza principalmente, de aguas subterráneas. (SISS, 2009).

La industria sanitaria enfrenta el desafío de tratar la presencia natural de metales de las aguas subterráneas, adaptando soluciones según los elementos observados, su concentración y los respectivos requisitos de calidad. La presencia de metales en la captación de aguas subterráneas es una característica común a nivel global (Hazan et. al., 2010) y la industria se ha visto en la obligación de tomar medidas para abatir sus concentraciones de manera de dejar las aguas aptas para su posterior suministro a la población.

En el norte de Chile, específicamente en las aguas subterráneas de la Pampa del Tamarugal y zonas aledañas, se observa la presencia de metales como magnesio, calcio, arsénico y manganeso, entre otros (Wagner 2015) por lo que la empresa Aguas del Altiplano, encargada del suministro de ciudades como Iquique, Alto Hospicio y Pozo Almonte ha debido habilitar diversos procesos y tratamientos para disminuir las concentraciones de estos minerales, con el objetivo de cumplir con todos los parámetros definidos en la Norma Chilena NCh409 /1.Of. 2005 y dejar el agua apta para el consumo humano. Sin perjuicio del cumplimiento normativo, con el pasar del tiempo se ha presentado una problemática operacional dentro de la extensa línea de conducción encargada de alimentar la zona de Alto Hospicio: de las paredes internas se ha formado una capa de manganeso que, luego de más de 40 años de operación, se encuentra adherida a la tubería, provocando que, al momento de haber una variación súbita del régimen hidráulico dentro de ella, estas partículas entren en suspensión, afectando la calidad del agua y poniendo en riesgo la infraestructura del sistema.

En el presente estudio se analizan tres alternativas complementarias para solucionar la problemática de la presencia del manganeso dentro de la tubería de conducción. La primera corresponde a una solución de fondo que apunta a la instauración de un sistema de abatimiento del manganeso en la etapa de producción, antes de su ingreso a la conducción. La segunda evalúa la instalación de una nueva línea auxiliar en paralelo que permita realizar el mantenimiento necesario a la línea principal sin tener que cortar el suministro de agua potable a la población. Por último, una solución que aborde la limpieza de la línea en etapas, dividiéndola en secciones para poder hacer la extracción del material adherido en las paredes de la tubería.

El objetivo de este estudio es determinar la mejor forma de realizar mantenimientos y limpieza a grandes tuberías, y evaluar si conviene prevenir estas afectaciones de largo plazo en la etapa de producción, o actuar directamente sobre los sistemas de transporte, con procesos de limpieza periódicos. Para esto se analiza el caso de la alimentación de agua de Alto Hospicio y se avalúa, técnica, operativa, ambiental y económicamente las alternativas citadas, buscando asegurar el suministro de agua potable para los habitantes de esta ciudad y, al mismo tiempo, evitar la interrupción de este.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

- Analizar alternativas que permitan mejorar la conducción de agua a la localidad de Alto Hospicio, con el fin de seleccionar una solución técnica y económicamente más eficiente para la problemática del manganoso, que se ajuste a las condiciones de operación del actual sistema y que pueda servir de referencia para casos similares de transporte de agua en el norte del país.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir distintas alternativas como medida de limpieza o refuerzo de la línea de conducción que alimenta Alto Hospicio.
- Analizar técnica, económica y operacionalmente las alternativas de mejoramiento y de mantenimiento propuestas para dar solución a la adherencia del manganoso en las paredes internas de la tubería.
- Proponer una metodología de evaluación, para seleccionar la mejor opción de intervención, detallando los intervalos de tiempo en los que debe realizarse el mantenimiento de la obra, asegurando el constante suministro de agua potable a las localidades de la zona.
- Levantar criterios de diseño, operación y mantenimiento, para sistemas de producción similares, que involucren grandes conducciones.

3 Antecedentes Generales

3.1 Fuentes de agua en Chile

En la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera, se identifican dos flujos principales de agua con direcciones opuestas: la precipitación (lluvia o nieve) y la evapotranspiración natural, que abarca la evaporación desde el suelo, cuerpos de agua y otras superficies, junto con la transpiración de las plantas. La diferencia entre estos dos flujos determina la disponibilidad superficial, de la cual se originan otros flujos y almacenamientos dentro del sistema hidrológico, como la escorrentía superficial que alimenta ríos, lagos y ecosistemas costeros. Sin mencionar la infiltración que contribuye a la recarga de acuíferos subterráneos. (*Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia [CR2], 2023*)

Con la información de la Figura 3-1: Precipitación, evapotranspiración natural y disponibilidad hídrica en Chile. **Fuente: CR2, 2023**, evidencia que la disponibilidad hídrica a nivel nacional tiene realidades muy desiguales dependiendo de la región del país. Por un lado, en las zonas áridas como Atacama prácticamente no precipita, mientras que en algunas zonas australes se registra más de 3.000 mm de precipitaciones en un año.

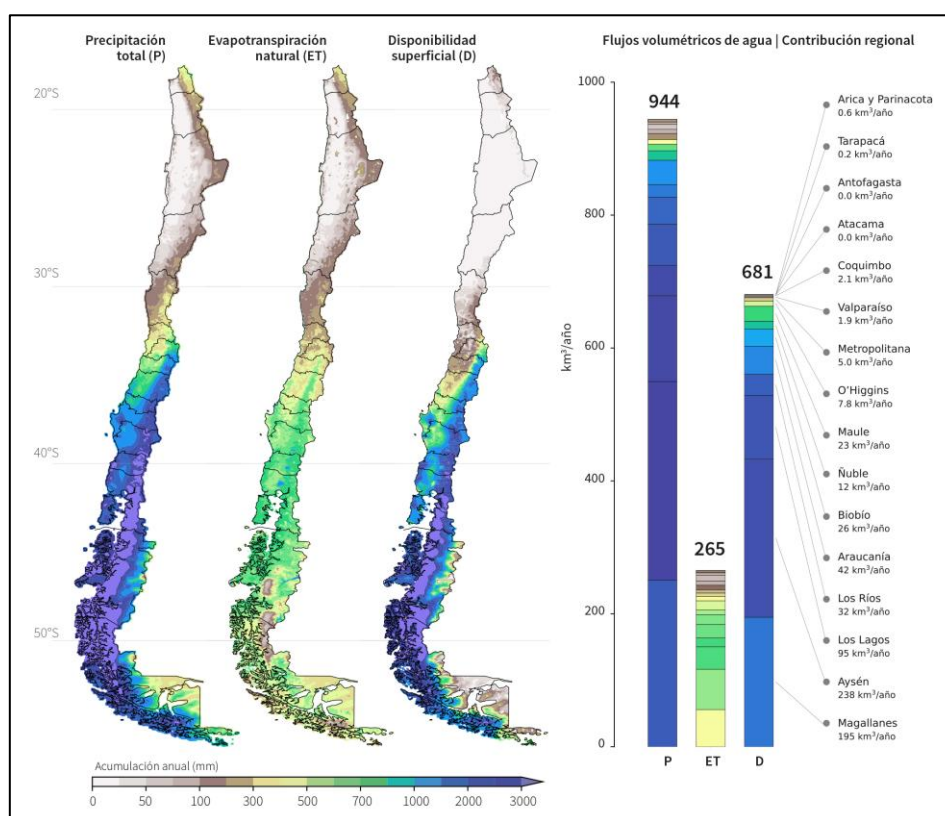


Figura 3-1: Precipitación, evapotranspiración natural y disponibilidad hídrica en Chile.

Fuente: CR2, 2023

Esta condición hace que en el extremo norte del país, el agua potable se obtenga principalmente de acuíferos subterráneos, como los del Valle de Azapa, Valle de Lluta y Pampa del Tamarugal. En Antofagasta, se emplea tanto el agua de los ríos pertenecientes a la cuenca del Loa como agua de mar desalada. En la región de Atacama, las principales fuentes de agua son los acuíferos de Copiapó y Huasco.

En el norte chico, las ciudades más grandes utilizan agua proveniente de los ríos Elqui, Limarí e Illapel, así como de los acuíferos ubicados en los valles de estos mismos ríos, como el acuífero de Elqui-Limarí.

En localidades más pequeñas, como Tongoy, Andacollo, Guanaqueros o Monte Patria, la única fuente de agua potable son las aguas subterráneas, lo cual es una práctica común en gran parte de esta zona del país.

En la zona central, ciudades como Valparaíso, Santiago y Rancagua se remiten tanto a los ríos Aconcagua, Maipo, Mapocho y Cachapoal como a aguas subterráneas. Por ejemplo, el acuífero Maipo, que abarca gran parte de la región Metropolitana, es una fuente crucial para el Gran Santiago. De manera similar, los acuíferos del valle del río Aconcagua abastecen a diversas localidades de la región de Valparaíso.

En el sur de Chile, los ríos Maule, Chillán, Bío Bío, Malleco, Calle-Calle y Rahue, junto con las aguas subterráneas extraídas de acuíferos cercanos a las ciudades, representan las principales fuentes de agua potable para esta zona.

En el extremo austral, los ríos, esteros, lagos y embalses son las fuentes locales más utilizadas. Ejemplos destacados incluyen los esteros de la cuenca del río Coyhaique, el lago General Carrera y, en Punta Arenas, el embalse Lynch y la laguna Parrillar. Todas estas fuentes de agua son sometidas a tratamientos previos para garantizar su potabilidad antes de ser consumidas. (Superintendencia de Servicios Sanitarios, [SISS], 2009)

De acuerdo con el informe más reciente de gestión del sector sanitario, publicado por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) en 2023, las fuentes de agua utilizadas se distribuyen de la siguiente forma: el 56,5% proviene de aguas subterráneas, el 42% de aguas superficiales y el 1,5% de agua de mar. Este desglose evidencia la predominancia del uso de aguas subterráneas en comparación con otras fuentes.

3.2 Aguas de la Cuenca de la Pampa del Tamarugal

La predominancia del clima desértico en la región de Tarapacá se traduce en la baja disponibilidad hídrica, llegando a alcanzar un flujo de solo el 6 m³/s, lejos de los 6.991 m³/s o de 5.329 m³/s de las regiones de Aysén y Magallanes, respectivamente (CR2, 2023). En este escenario, Aguas del Altiplano, empresa encargada de regular los servicios sanitarios de la zona, capta aguas subterráneas de la cuenca de la Pampa del Tamarugal (ver Figura 3-2) para abastecer las principales ciudades de la Región, debiendo tratar las aguas mediante procesos de filtración y potabilización, para lograr ser apta para el consumo. El 100% del agua potable de la región tiene esta fuente de explotación. (SISS, 2023)

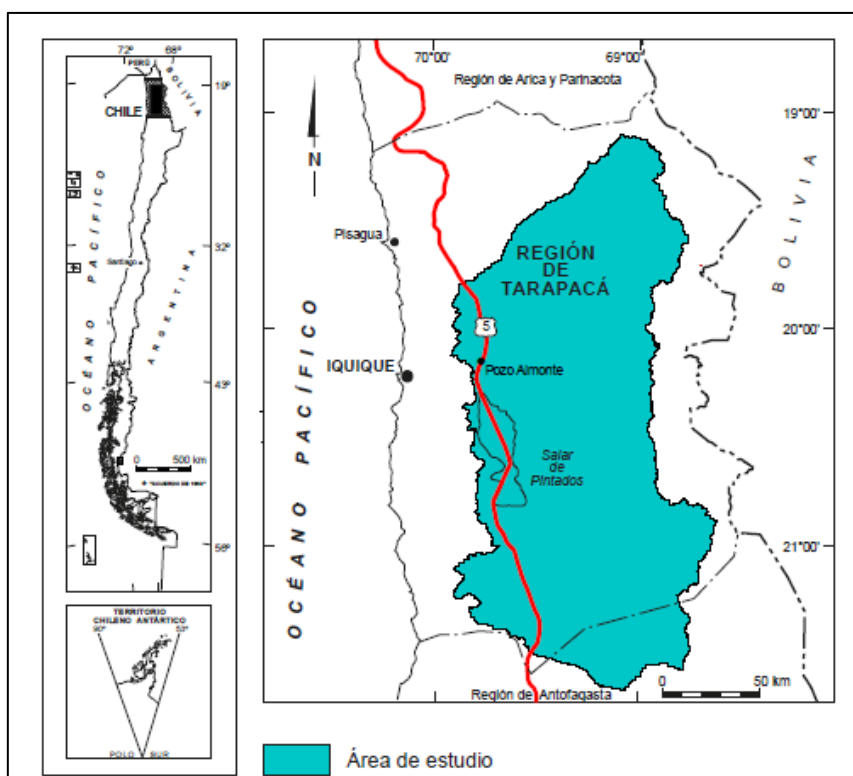


Figura 3-2: Mapa de la Cuenca del Tamarugal. Fuente: SERNAGEOMIN, 2017

El informe tarifario final de Aguas del Altiplano S.A. correspondiente al período 2013-2018 incluye un análisis de la calidad del recurso hídrico en la Pampa del Tamarugal. En este estudio, se caracterizaron las aguas crudas captadas desde los diversos acuíferos de la zona, detectándose la presencia significativa de múltiples compuestos. Entre estos destacan el arsénico, el hierro, el manganeso, cloruros, los sulfatos y otros sólidos disueltos. Por ello, la empresa responsable debe implementar procesos de filtración y remoción de ciertos metales para cumplir con la normativa NCh409/1.Of.2005, la cual establece los límites permitidos de concentración de metales. De este modo, se garantiza que el agua cumpla con los estándares requeridos para su distribución a la población.

En la Pampa del Tamarugal, los sistemas de producción de agua potable que abastecen las distintas localidades de la región se denominan El Carmelo y Canchones. El sistema El Carmelo (ver Figura 3-3), se usa para suministrar agua a las localidades de Pozo Almonte e Iquique. Por otro lado, el sistema Canchones (ver Figura 3-4) tiene la responsabilidad de abastecer a las comunidades de Alto Hospicio, Iquique y La Huayca (SISS, 2018). Estos sistemas juegan un papel fundamental en la provisión de agua potable para la población, garantizando el acceso a este recurso esencial en una zona caracterizada por sus condiciones áridas.

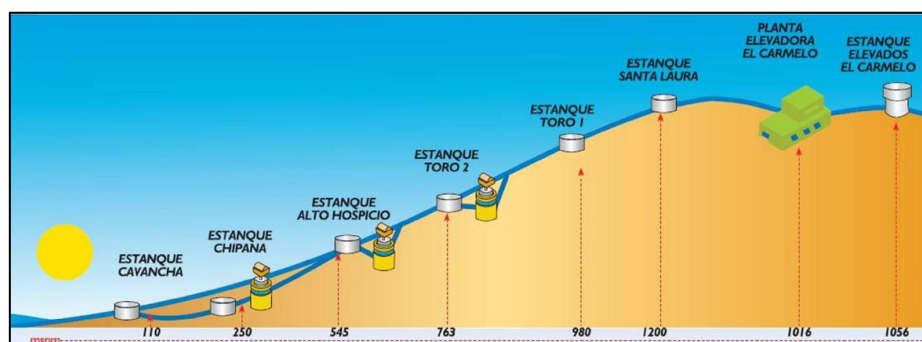


Figura 3-3: Sistema de Agua El Carmelo. Fuente: Enernuevas, s.f

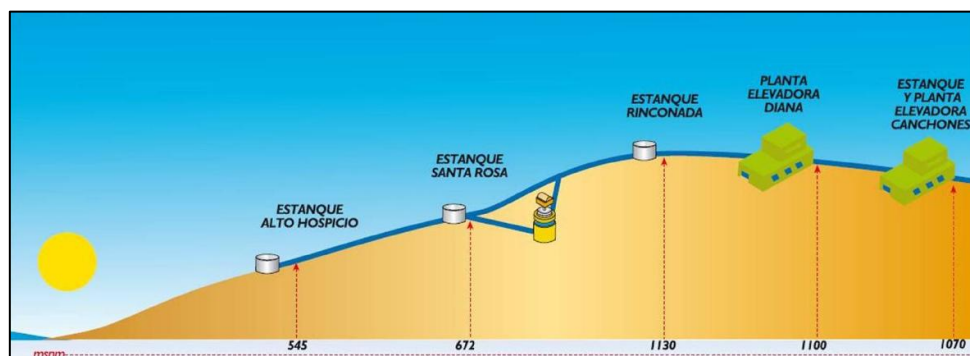


Figura 3-4: Sistema de Agua Canchones. Fuente: *Enernuevas,s.f.*

3.3 Sistema de producción y línea de Conducción Canchones

En la Figura 3-5 se muestra el sistema de producción de agua Canchones, el que está compuesto por diversos estanques y plantas elevadoras para poder hacer frente a los diferentes desniveles presentes en ese sector del desierto. La extracción de agua se hace a través de 18 sondajes (13 del sistema de Canchones y 5 de Cumiñalla) a una profundidad, promedio, de 100 metros para posteriormente ser conducida hasta los estanques Canchones (Figura 3-6), ubicados en el mismo recinto de los sondajes. Desde ahí se dirige, por una tubería de hierro dúctil, hasta el recinto de Diana a 29.9 km., por medio de la PEAP Canchones, donde hay, además dos estanques semienterrados (1000 m³ cada uno). Desde este mismo punto es elevada a través de la PEAP Diana, por medio de una conducción de 3 km. hasta el recinto Rinconada. Este es el punto más alto del sistema de producción y consta de dos estanques semienterrados (5000 m³ y 6000 m³), luego la producción de Canchones es conducida mediante gravedad hasta la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) Santa Rosa a través de una tubería hierro dúctil de 32.6 km. (Aguas del Altiplano, 2018)

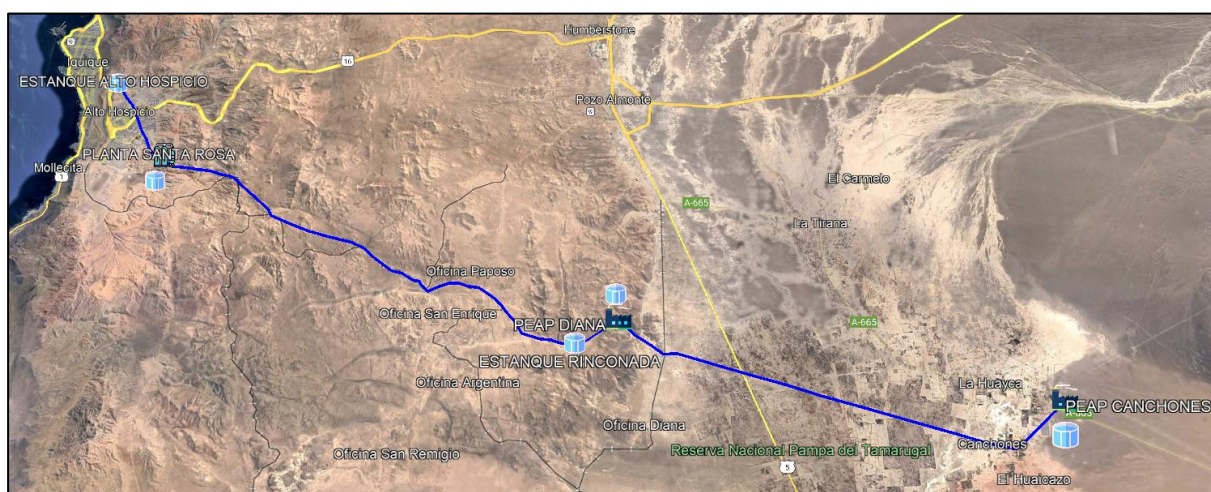


Figura 3-5: Mapa en planta Sistema Canchones. Fuente: *Elaboración propia.*



Figura 3-6: Estanques y planta elevadora Canchones. *Fuente: GoogleEarth, 2023.*

Cabe destacar que la tubería se encuentra en el exterior a lo largo de toda su extensión, salvo en el primer tramo de 3 km, entre Canchones y Diana, donde está instalada enterrada, bajo nivel de terreno. (Ver Figura 3-7)



Figura 3-7: Red Canchones. *Fuente: Aguas del Altiplano, 2024.*

La planta de Santa Rosa (Figura 3-8) procesa el 100% del caudal destinado al abastecimiento de agua en la localidad de Alto Hospicio. En esta planta se lleva a cabo la filtración de metales con altas concentraciones, destacándose principalmente la remoción de arsénico en dos etapas (filtración rápida y ultrafiltración), y la desinfección con gas cloro. Este proceso asegura que el agua tratada cumpla con las normativas de calidad requeridas, convirtiéndola en apta para el consumo humano.

Una vez tratada el agua, el flujo es dirigido hacia los estanques Santa Rosa (10.000 m³, 10.000 m³ y 500 m³), desde donde alimenta La Huayca y Alto Hospicio en su totalidad, y a un 20% de la ciudad de Iquique. El remanente es enviado a los estanques Alto Hospicio, donde se almacena temporalmente. En este punto, como se ilustra en la Figura 3-4, el agua almacenada se une al sistema de producción El Carmelo, el cual también abastece a otras localidades cercanas. Esta integración permite una distribución

más eficiente del recurso, optimizando la cobertura del suministro de agua potable a las diversas comunidades de la región.



Figura 3-8: Estanques y PTAP Santa Rosa. Fuente: Aguas del Altiplano, 2017.

Al ser una única red que trabaja en el abastecimiento de Alto Hospicio, las reservas de agua almacenadas en los estanques del sistema de Canchones son de suma relevancia para el abastecimiento del sector, estos poseen una autonomía aproximadamente de 15 horas. Esta capacidad, aunque crítica, subraya la importancia vital de la infraestructura, dado que cualquier falla o complicación operativa en su funcionamiento impactaría de forma directa en el suministro para toda la población.

3.4 Problemática operacional

El sistema de producción de Canchones, basado en la extracción de aguas subterráneas, enfrenta el desafío de controlar la presencia de metales disueltos en el agua. Entre ellos, el manganeso (Mn) destaca por generar complicaciones operativas, especialmente en los primeros kilómetros de la red, que involucra el tramo de impulsión Canchones - Diana, y en los estanques de este último recinto. El Mn tiende a precipitar de forma natural en el interior de las tuberías, formando incrustaciones en paredes internas. Ante variaciones bruscas de caudal, estas se desprenden en forma de partículas, lo que provoca turbiedad en el agua y afecta los estanques de almacenamiento en Diana, donde los sedimentos se acumulan en el fondo. Esta acumulación puede dañar los revestimientos internos y favorecer la proliferación bacteriana, comprometiendo la calidad y seguridad del agua.

En los últimos diez años se han presentado dos eventos de rotura en el primer tramo de la impulsión hacia Diana. El último (ver Figura 3-9), ocurrido en febrero de 2023, provocando una interrupción de cuatro días en el suministro de agua potable en la comuna de Alto Hospicio (SISS,2023).



Figura 3-9: Rotura tubería de impulsión Canchones-Diana. *Fuente: SISS 2023.*

La principal dificultad no radica en la reposición del suministro como tal, sino en que el agua recupere las condiciones necesarias para ser tratada en la PTAP Santa Rosa. Esto se debe al arrastre de manganeso precipitado desde el interior de las tuberías (ver Figura 3-10). Sin mencionar que producto de estas incrustaciones, la tubería sufre una disminución del espesor promedio de un 18%, con máximos de 35% en algunas zonas. (Aguas del Altiplano, 2024)

Para mitigar este problema en los estanques, Aguas del Altiplano implementa un protocolo de mantenimiento cada tres años, el cual consiste en operativos de limpieza de buceo realizados por personal calificado, quienes se sumergen en los estanques de Diana con equipamiento de succión. Durante las intervenciones, se extraen lodos y residuos adheridos a la infraestructura de los estanques, garantizando la disminución de los niveles de manganeso. Los lavados de estanques tienden a demorar entre cuatro y cinco días.



Figura 3-10: Precipitación de Mn al interior de la tubería de impulsión Canchones-Diana.

Fuente: Aguas del Altiplano, 2024.

El presente estudio nace de la necesidad de evaluar alternativas que permitan mejorar el sistema de producción de agua potable en la línea de conducción de Alto Hospicio, con el objetivo de solucionar el problema de incrustaciones de manganeso en la red de agua que une los sectores Canchones-Diana y, por consiguiente, de los estanques de esta última. Estas soluciones no solo pueden servir para prevenir su acumulación en esta conducción, sino también pueden ser aplicadas otras, donde el suministro depende de una única fuente y no puede permitirse interrupciones prolongadas, ni poner en peligro el recurso hídrico.

En este contexto, resulta fundamental analizar las estrategias que la empresa encargada puede implementar, tanto en la fase de diseño de las instalaciones como durante su operación, para garantizar la continuidad y calidad del servicio.

4 Metodología

El presente estudio se aborda en cuatro etapas, las que se describen a continuación:

4.1 Recopilación y análisis antecedentes

En esta etapa inicial, se recopila información sobre la adherencia de metales en las paredes internas de las tuberías dentro de la industria sanitaria, con el objetivo de analizar si este fenómeno ocurre con mayor frecuencia en ciertos tipos de materiales y determinar qué metales son los más propensos a incrustarse en ellas. Este análisis proporciona un panorama general sobre la magnitud del problema y las estrategias que actualmente implementa la industria para mitigarlo.

Posteriormente, se lleva a cabo una investigación sobre las principales técnicas de limpieza de tuberías utilizadas en el mercado, así como los métodos preventivos empleados para evitar la acumulación de material en las conducciones de agua potable.

Finalmente se describe la forma de remoción de manganeso más utilizada en la industria y como se abordó en el sistema de abastecimiento de estudio, analizando cómo este proceso puede impactar en la estabilidad de la red de distribución y poner en riesgo la integridad de la infraestructura.

Con la información recopilada, se logra una visión integral del sector y de las soluciones disponibles, lo que permite identificar y seleccionar tres alternativas de intervención viables, específicamente, orientadas a abordar la problemática de la adherencia de manganeso en las paredes internas de las tuberías y que llevan a una acumulación de sedimentos en otros elementos del sistema como estanques.

4.2 Diseño conceptual de las alternativas de intervención

Se presentan las tres alternativas a estudiar de manera general, para luego ser analizadas en profundidad, con el propósito de determinar cuál de ellas se adapta mejor a las condiciones particulares del sistema de conducción y ofrece una solución eficiente y sostenible a largo plazo.

Para el desarrollo este punto, se recopila información sobre cada una de las tres alternativas seleccionadas previamente, describiendo las consideraciones técnicas, operativas y ambientales necesarias para su implementación.

En primer lugar, se lleva a cabo un estudio técnico, en el cual se examinan las modificaciones y adaptaciones estructurales que deben realizarse en el sistema de conducción actual. Este análisis incluye los materiales necesarios, la infraestructura existente y los cambios que se requieren para garantizar un funcionamiento óptimo y seguro.

Posteriormente, se realiza un estudio operativo, donde se identifican y establecen los indicadores de control más relevantes para asegurar la continuidad y calidad del servicio de agua potable para la población. En este apartado, se consideran aspectos como la eficiencia del sistema, así como la implementación de medidas preventivas para minimizar posibles interrupciones en el suministro.

Finalmente, se efectúa un estudio las consideraciones ambientales, cuyo propósito es determinar el impacto que la ejecución del proyecto podría generar en la zona de intervención. Este análisis contempla aspectos como la posible alteración del ecosistema, el manejo de residuos generados durante la construcción y operación del sistema, así como la identificación de los permisos y autorizaciones necesarias para cumplir con la normativa ambiental vigente y evitar conflictos con las entidades reguladoras.

En conjunto, estos estudios permiten realizar una evaluación integral de las alternativas disponibles, proporcionando información precisa y fundamentada que facilita la toma de decisiones y contribuye a la selección de la mejor opción desde una perspectiva técnica, operativa y ambiental.

4.3 Evaluación de alternativas

En base a la información recopilada en cada uno de los tres ámbitos previamente analizados técnico, operativo y ambiental, se lleva a cabo una comparativa entre las alternativas propuestas. El objetivo es contrastar sus ventajas y desventajas, permitiendo así una evaluación que facilite la toma de decisiones.

A continuación, se desarrolla un estudio económico, en el que se lleva a cabo una estimación del costo asociado a la implementación de cada alternativa. Esta evaluación se basa en referencias de costos provenientes de obras sanitarias ejecutadas en la región en años anteriores, considerando factores como la inversión en infraestructura, materiales, mano de obra y posibles costos adicionales derivados de imprevistos o ajustes en el proyecto.

Para generar una comparación entre las alternativas se considera una relación matemática que contemple cada uno de los ámbitos que describen las alternativas. Se califican aspectos claves como la viabilidad técnica de las intervenciones, fiabilidad en la continuidad del servicio e impacto ambiental, para luego relacionarla con el monto total de inversión de cada alternativa.

Esta evaluación no solo permite optimizar la infraestructura existente, sino que también permite realizar planes estratégicos para el desarrollo sostenible del sistema de distribución de agua potable en la región.

4.4 Propuesta final

Considerando los aspectos analizados, se adopta una solución que aborde de manera integral la alternativa de intervención de limpieza más adecuada para la situación actual en estudio. En particular, se plantea una estrategia para la limpieza del manganoso en la conducción Canchones, específicamente en el tramo comprendido entre los sectores de Canchones y Diana. Como parte de esta solución, se presentan indicadores de gestión que permitan implementar de manera efectiva la medida propuesta, asegurando el cumplimiento de la normativa y la ejecución responsable de esta.

Asimismo, se establecen lineamientos para futuros diseños de obras similares, con la finalidad de prevenir la acumulación de metales en la infraestructura del sistema de distribución y garantizar su óptimo funcionamiento a largo plazo.

Se busca proporcionar a la empresa encargada del servicio las herramientas necesarias para garantizar un suministro continuo y de calidad, minimizando riesgos de cortes en el abastecimiento y evitando problemas de turbiedad en el agua potable distribuida a la población.

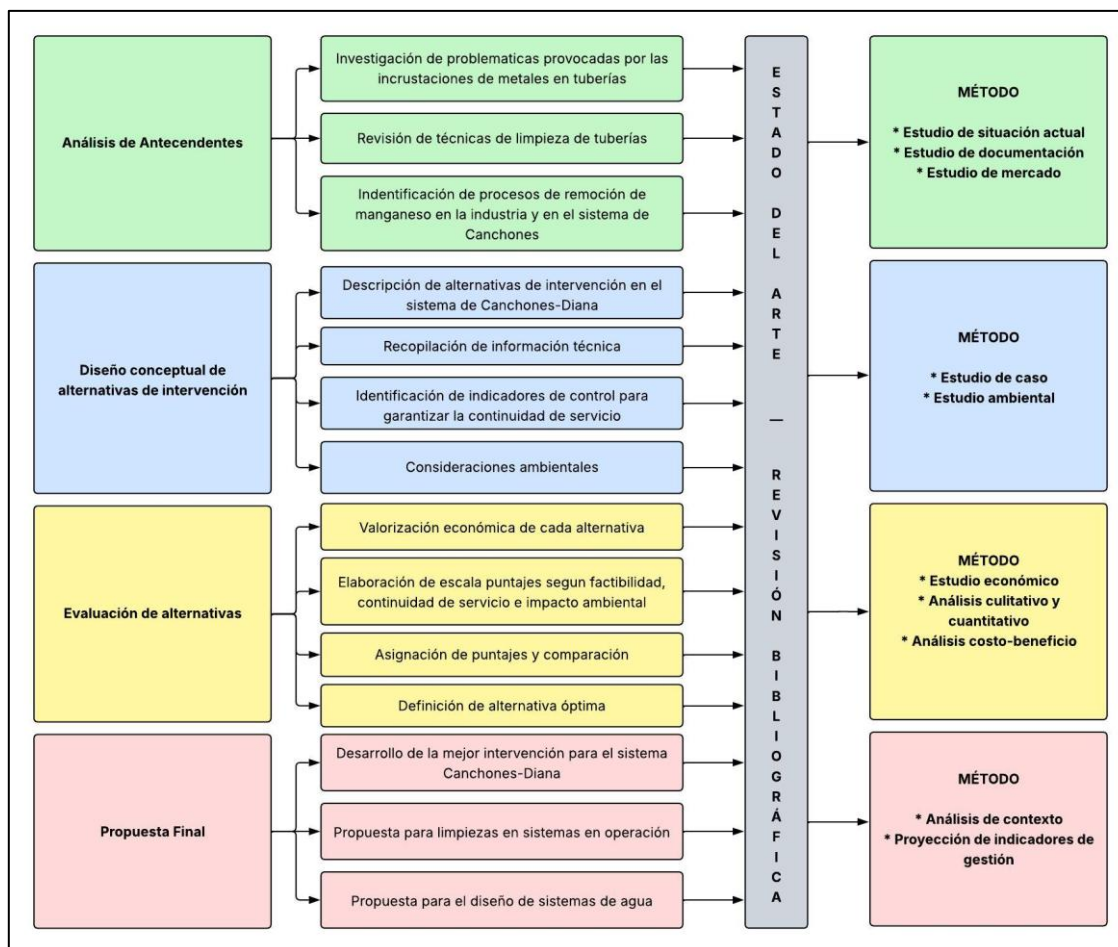


Figura 4-1: Diagrama metodológico. Fuente: Elaboración propia.

5 Análisis de Antecedentes

5.1 Adherencia de metales en redes de agua

Las incrustaciones en las tuberías de agua potable son depósitos sólidos compuestos por minerales y metales presentes en el agua. Estos se forman como una capa adherida a las paredes interiores de las tuberías debido a la precipitación de estos. Frecuentemente, pueden alcanzar varios centímetros de espesor, lo que incrementa la rugosidad de la red y reduce el área de flujo, afectando así el rendimiento del sistema. (Crabtree et al., 1999). Entre otros problemas técnicos están la disminución de la calidad del agua, desarrollo de bacterias sobre las incrustaciones, incremento de presiones y reducción de productividad de un proceso que se refleja en gastos para la realización de mantenimientos. Algunos de los metales más comunes que pueden generar incrustaciones se encuentran el carbonato de calcio (CaCO_3) y magnesio (MgCO_3), los cuales precipitan y forman depósitos debido a las condiciones de alta dureza del agua. (Contreras & Nieves, 2023).

El hierro y el manganeso son metales, que también, tienen una alta presencia en aguas subterráneas y que al entrar en contacto con oxígeno tienden a oxidarse formando óxidos insolubles que se adhieren en las paredes de las tuberías provocando coloraciones rojizas y cambio de sabor del agua. (Pennstate Extension, 2023)

Las incrustaciones de los diversos minerales pueden llegar a servir como sustrato para el crecimiento de biofilm, ya que al aumentar la rugosidad favorece la adhesión de organismos. El biofilm o biopelícula corresponde a una capa viscosa o dura formada por microorganismos y depósitos minerales (hierro, calcio, manganeso, entre otros), que se desarrolla entre una fase sólida y líquida en forma natural o artificial, la cual se acumula en las paredes internas de las tuberías de agua. La presencia de estos depósitos puede generar un efecto negativo en los tubos de transporte de agua ya que brindan protección a organismos patógenos que potencialmente pueden llegar a afectar la salud humana. (Rojas, 2008).

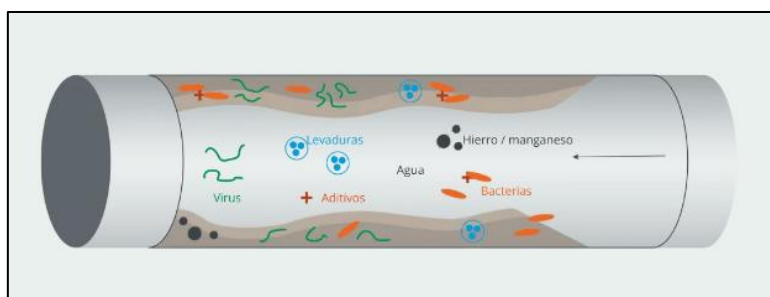


Figura 5-1: Biofilm en redes de agua. Fuente: Schippers. s.f.

El desarrollo de biofilm puede ocurrir en tuberías fabricadas con cualquier tipo de material, acero inoxidable, plástico u otras aleaciones. Aunque algunos materiales pueden parecer más resistentes a su formación, en realidad todos son susceptibles a la acumulación de estos microorganismos y compuestos asociados. Sin embargo, las superficies más lisas suelen retardar el proceso inicial de adhesión y crecimiento del biofilm, lo que influye en la velocidad con la que se desarrollan estas acumulaciones.

Además, la interacción entre el agua y el material de la tubería juega un rol clave en la adherencia. Dependiendo de la composición química del agua de la fuente, ciertos materiales pueden favorecer o dificultar la formación del biofilm. Por ejemplo, aguas con alto contenido de hierro o manganeso pueden acelerar la formación en tuberías metálicas debido a procesos de oxidación, mientras que en tuberías plásticas la adherencia microbiana puede depender más de la rugosidad y de la carga electrostática de la superficie. En consecuencia, la elección del material y el tratamiento previo del agua son factores determinantes para minimizar la acumulación de biofilm en las redes de distribución. (Gonzalez, 2017)

Las incrustaciones y biofilm en tuberías metálicas tienden a favorecer el desgaste ya que su presencia produce compuestos sulfurosos que atacan químicamente el material de la superficie, lo que provoca zonas de oxígeno diferencial que permiten concentración de iones corrosivos localizados, que lleva a picaduras en el tubo, difíciles de detectar y que pueden llegar a causar fallas estructurales. La corrosión es la principal falla en redes de agua por lo que en la industria cada vez se está inclinando por materiales plásticos como el HDPE, el cual tiene una alta resistencia química por lo que no se oxida ni se corroe, sin mencionar que es menos costosa y mucho más fácil de trabajar en comparación a las metálicas. (Polypipe Plastics., s.f.)



Figura 5-2: Falla por corrosión en elementos de un sistema de agua. Fuente: Merus. s.f.

Tal como se expuso en el apartado de problemática operacional, la línea de Canchones presenta inconvenientes en su primer tramo, específicamente en el sector comprendido entre Canchones y Diana. En esta zona, el manganeso presente en las aguas subterráneas ha generado incrustaciones en las paredes internas de la tubería. Cada vez que ocurre un cambio en el régimen hidráulico, dicho material se resuspende, lo que compromete la integridad estructural de la red y favorece el arrastre de sedimentos a lo largo del sistema.

5.2 Métodos limpieza de redes de agua potable y elección

La limpieza de las redes de agua potable cumple un rol importante al momento de garantizar la calidad del agua y preservar la infraestructura de distribución. En la industria sanitaria existen una serie de mecanismos de limpieza entre las cuales se encuentran:

- **Air purging**
Este método de limpieza de tuberías y matrices de agua consiste en un dispositivo de aire comprimido para aumentar la velocidad del flujo dentro del sistema. Al forzar el agua a circular a una velocidad superior a la que lo hace en condiciones normales, se genera un flujo turbulento de alta energía. Esta turbulencia permite desprender, movilizar y eliminar sedimentos, residuos y partículas acumuladas en las paredes internas de la red, mejorando el rendimiento del sistema. Además, esta técnica ayuda a prevenir obstrucciones, optimiza la capacidad de conducción del agua y prolonga la vida útil de la infraestructura.
- **Pigging (Limpieza mecánica)**
Método de limpieza utilizado para la eliminación de residuos, sedimentos y otras impurezas en la interior de los sistemas de tuberías, consiste en un dispositivo conocido como “pig” (Pipeline Inspection Gauges) el cual es de forma cilíndrica y está diseñado para ajustarse al diámetro de la tubería. Este se introduce en la red y es impulsado a través de la presión del propio fluido y mientras avanza va removiendo de manera eficiente los depósitos presentes en las paredes internas, como incrustaciones, lodo, biofilm, entre otros. Gracias a su versatilidad es una técnica

utilizada en el mantenimiento preventivo como la restauración de tuberías obstruidas, permitiendo mejorar el rendimiento hidráulico y prolongando la vida útil del sistema.

- **Limpieza química**

Proceso de limpieza que emplea diversos productos químicos para disolver y eliminar depósitos acumulados en las paredes internas de las tuberías. Este método se ocupa como última instancia, en sistemas donde otro tipo de métodos no tienen buenos resultados o no son aplicables. Los agentes químicos utilizados dependen del tipo de depósito que se requiere remover, los ácidos se emplean para la eliminación de incrustaciones minerales y el álcali para la materia orgánica. La limpieza química y el posterior enjuague se deben realizar bajo las normativas de entidades internacionales como AWWA (American Water Works Association) y EPA (Environmental Protection Agency), que regulan este tipo de procedimientos y las concentraciones permitidas de los químicos utilizados.

En base a los métodos limpieza previamente descritos, se requiere elegir uno de ellos para el posterior análisis a fondo. Si bien los tres métodos son aplicables a la red de conducción de Canchones, es necesario seleccionar cuál de ellas es la más conveniente.

Se puede dar cuenta que la limpieza química es la más desfavorable, principalmente por las precisiones con las que hay que trabajarla y por el gran impacto que tiene, tanto en la red y en el entorno de esta, pensando en que los residuos son altamente contaminantes para el medio ambiente. Por otro lado, está el tipo de limpieza “air purging”, que tiene la ventaja de, que al momento de ser aplicado genera cortes de suministro de agua breves, los cuales podrían fácilmente cubrirse con las reservas presentes en los estanques del sistema. Pero al ser un método que trabaja en base a aire comprimido, se hace muy difícil en la red de Canchones llegar a altas velocidades ya que la sección transversal que posee es de un diámetro importante (600 mm.), sin mencionar que estas variaciones de caudal pueden llegar a provocar golpes de ariete que puedan poner en peligro la infraestructura de la red. La limpieza pigging, parece ser la más favorable considerando lo ya mencionado, el propio flujo de la red le entrega la presión necesaria para generar el arrastre del dispositivo (ver Figura 5-3) y el diámetro del tubo no es inconveniente debido a que se pueden encontrar “pig” de todo tipo de tamaños. El inconveniente de este método es que debe tener puntos de entrada y salidas del dispositivo a lo largo de la red, por lo que habría que considerar una serie de intervenciones del tubo que va entre los sectores de Canchones y Diana.

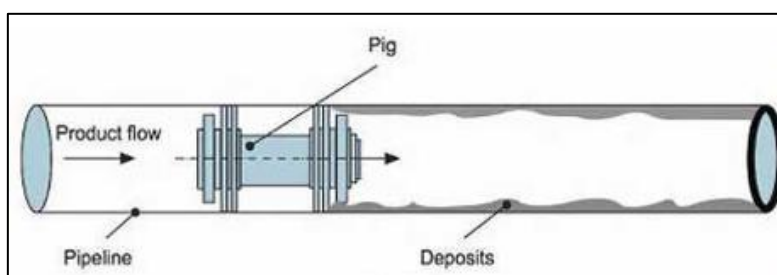


Figura 5-3: Funcionamiento sistema pigging. Fuente: EnggCiclopedia. s.f.

Para mantener la continuidad operacional, en el caso de la línea analizada, se debe contemplar el uso de estos sistemas Hot-Tapping, una técnica avanzada que permite realizar perforaciones precisas en la red de agua sin interrumpir el suministro ni despresurizar el sistema. Este procedimiento consiste en la instalación de una montura de refuerzo y una válvula de paso total, a través de las cuales una broca especializada penetra la tubería en carga, garantizando la estanqueidad en todo momento.

5.3 Métodos de remoción de Manganese en aguas

El tratamiento del manganeso en aguas crudas destinadas al consumo humano se realiza, principalmente, mediante procesos de oxidación y filtración. Esta combinación permite transformar el manganeso disuelto en partículas sólidas mediante el uso de agentes oxidantes, para luego retenerlas a través de medios filtrantes especializados.

Este proceso es fundamental para evitar la formación de depósitos y biopelículas en las tuberías, los cuales suelen desprenderse ante fluctuaciones de presión afectando la turbiedad del suministro. Al asegurar una eliminación eficiente desde la captación, no solo se cumple con la normativa de potabilidad vigente, sino que se optimiza la vida útil de la infraestructura, reduciendo significativamente la frecuencia de intervenciones correctivas y garantizando un servicio constante y de alta calidad para la población.

Históricamente, el sistema de producción Canchones operó bajo un esquema donde la torre de oxidación cumplía un rol inicial, permitiendo que el manganeso se transformara en partículas sólidas para que luego se depositaran de forma natural por decantación. Este material era arrastrado por el flujo hasta los estanques de regulación del trayecto, principalmente Diana y Santa Rosa, donde los óxidos quedaban confinados para ser posteriormente retirados de forma manual durante las limpiezas periódicas de dichas estructuras.

Sin embargo, con el paso del tiempo, esta solución de remoción pasiva se transformó en un foco de riesgo operacional. La acumulación sostenida de óxidos en las paredes internas de las matrices generó una situación de vulnerabilidad ante cualquier cambio hidráulico de la red. De este modo, fluctuaciones en la presión, variaciones en los caudales de bombeo o reinicios del sistema tras detenciones programadas, provocan el desprendimiento masivo de este material acumulado. Este fenómeno no solo afecta la turbiedad y las cualidades estéticas del agua en las zonas de consumo, sino que también evidencia la necesidad de transitar hacia métodos de mantenimiento más proactivos y controlados, que permitan una limpieza profunda y garanticen la continuidad del servicio en un entorno tan crítico como el norte de Chile.

6 Diseño conceptual de las alternativas de intervención

Con el objetivo de controlar la presencia y acumulación de manganeso dentro de las conducciones, y con ello, prevenir cualquier tipo de inconveniente en la infraestructura del sistema y en la calidad del agua a suministrar se analiza las opciones de limpieza de la tubería existente, además de la instalación de nueva infraestructura, como sistemas de tratamiento y conducciones paralelas. Las soluciones desarrolladas no solo se limitan a este caso en particular, sino que puede servir como guía para otras conducciones del Norte de Chile, en etapa de operación o diseño, en donde el abastecimiento se hace únicamente de la extracción de aguas subterráneas.

En el caso analizado, para que la intervención sea considerada aceptable, debe cumplir con dos condiciones fundamentales:

- Garantizar la continuidad del suministro de agua en Alto-Hospicio. Esto implica que las labores de limpieza deben programarse con precisión y ejecutarse dentro de plazos acotados, evitando interrupciones prolongadas en el servicio.
- Mitigar los efectos ambientales y operativos de la propuesta, por ejemplo, contar con infraestructura de evacuación de aguas residuales, como piscinas, recintos o sistemas especializados, durante los procesos de lavado. Esto asegura una gestión adecuada de los residuos generados.

En la Figura 6-1 se observa un esquema de la actual zona de interés para el estudio.

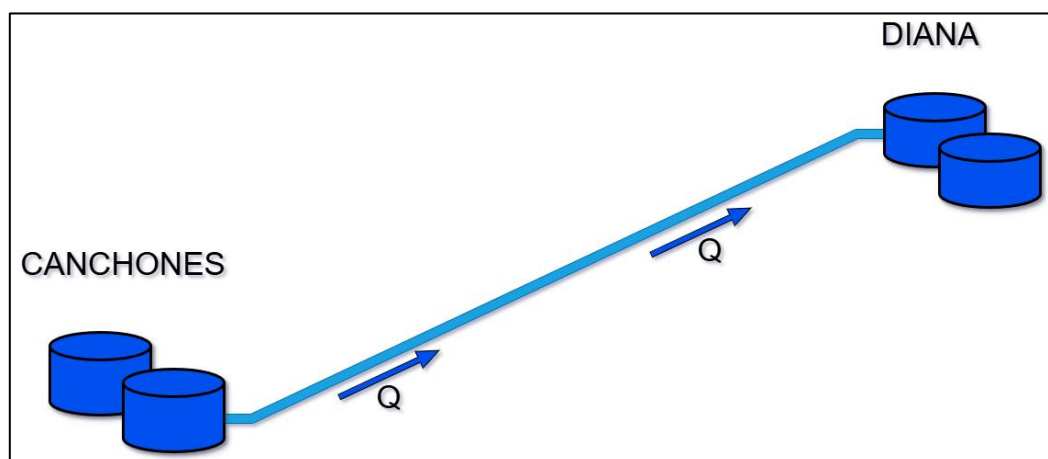


Figura 6-1: Esquema Canchones-Diana. Fuente: *Elaboración propia.*

Los tres tipos de alternativas de intervención se presentan y se describen a continuación:

6.1 Sistema de abatimiento de manganeso en etapa de producción

Esta propuesta evalúa la implementación de un nuevo sistema de tratamiento en el sector de Canchones, enfocado en la remoción de manganeso durante la fase producción. Tiene como objetivo la incorporación de procesos de filtración del agua antes de su bombeo hacia el sector Diana. Mediante esta intervención, se busca acabar con las dificultades proporcionadas por la presencia de manganeso en las superficies internas de las tuberías, mitigando riesgos operativos y daños estructurales asociados a la acumulación de este metal. De este modo, se pretende garantizar un flujo eficiente y seguro del recurso hídrico, evitando interferencias en las etapas posteriores de transporte del agua. La iniciativa no solo prioriza la optimización de la infraestructura existente, sino también la prevención de fallas derivadas de la presencia de contaminantes en el sistema de conducción. (Ver esquema en Figura 6-2)

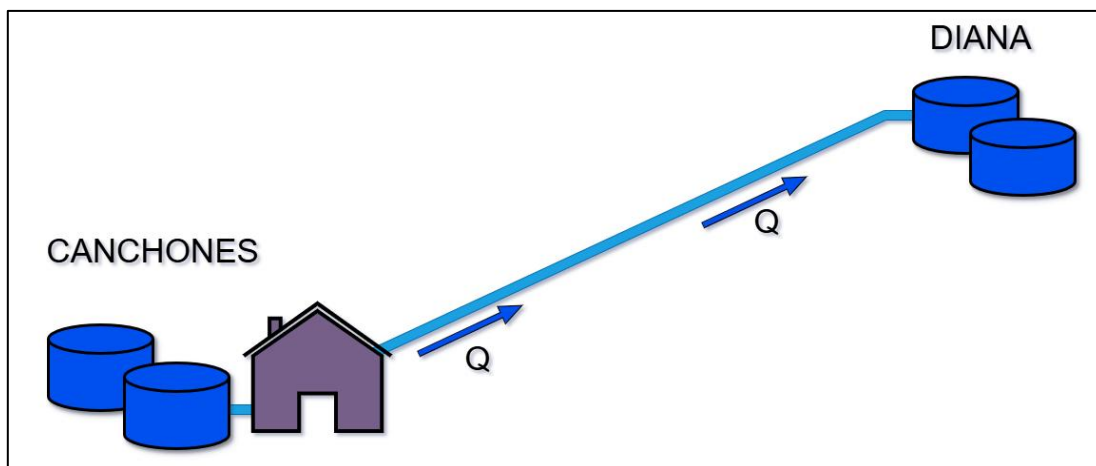


Figura 6-2: Esquema Canchones- Diana con planta abatimiento en Canchones.

Fuente: Elaboración propia

6.2 Línea de conducción Paralela

Esta iniciativa propone la construcción de una segunda línea de conducción entre los recintos de Canchones y Diana, manteniendo las especificaciones técnicas, diseño y emplazada de forma paralela a la infraestructura existente. Con el objetivo de establecer un sistema de operación alternada entre ambas conducciones, permitiendo la realización de mantenimientos preventivos y procedimientos de limpieza en la línea que se encuentre fuera de servicio. Logrando optimizar la gestión sin paralizar el servicio durante las intervenciones. Se busca evitar cortes que afecten la continuidad operativa, reduciendo así los riesgos asociados a la acumulación de sedimentos o deterioro de las tuberías. La implementación de esta infraestructura complementaria no solo asegura la disponibilidad permanente del suministro, sino que también fortalece la capacidad de respuesta del sistema ante eventuales contingencias. (Ver esquema en Figura 6-3)

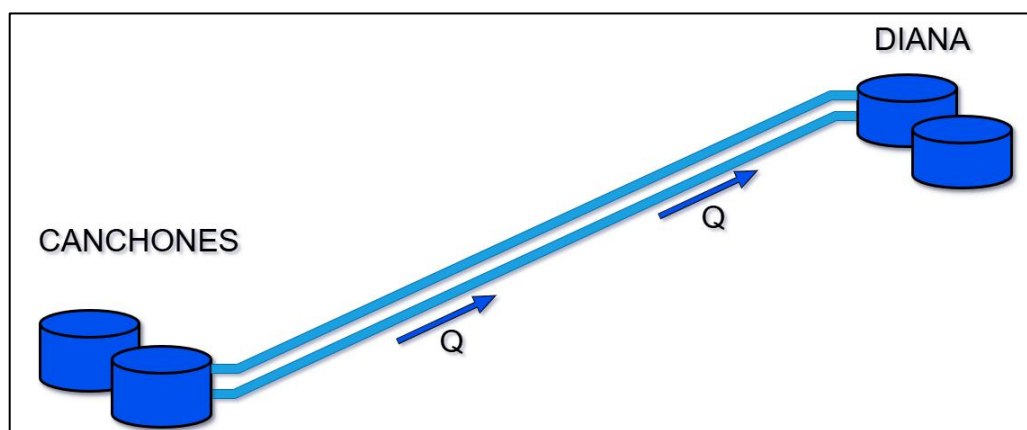


Figura 6-3: Esquema Canchones- Diana con línea paralela. *Fuente: Elaboración propia*

6.3 Limpieza por tramos

Esta alternativa contempla la limpieza de la línea de conducción que conecta Canchones con Diana mediante el método previamente seleccionado, el "pigging". Para su correcta ejecución, el proceso debe

realizarse por tramos dentro del tubo, lo que permite un control más eficiente y seguro de la operación. Esto requiere puntos específicos de entrada y salida en la red, por lo que es necesario incorporar válvulas y otros componentes adicionales a la línea existente. Asimismo, se deben efectuar perforaciones en el tubo que permitan la instalación de elementos que permitan lanzamiento y la recuperación de los dispositivos llamados “pigs”.

Para llevar a cabo estas modificaciones sin interrumpir el flujo continuo de agua, se considera el uso de la técnica conocida como “hot tapping”. Esta consiste en realizar perforaciones en una tubería sin la necesidad de detener el suministro, lo que permite instalar las conexiones necesarias para el funcionamiento del método de limpieza. (Ver esquema en Figura 6-4)

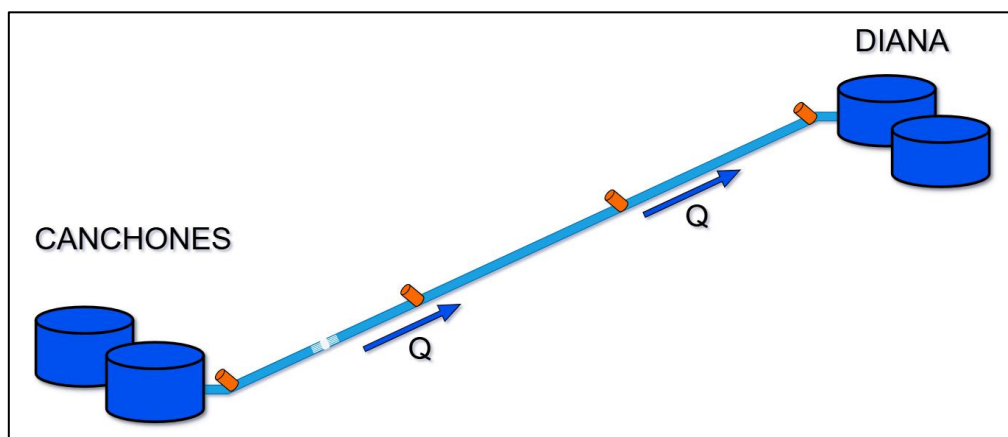


Figura 6-4: Esquema Canchones - Diana con lanzadores y receptores de “pigs”.

Fuente: Elaboración propia

6.4 Diseño de sistema de abatimiento de manganeso en etapa de producción

- Aspectos técnicos

El sistema de tratamiento propuesto integra tecnologías físicas y químicas para eliminar eficientemente el manganeso (Mn) del agua. En primer lugar, se emplean métodos de filtración compuestos por arena y zeolitas, materiales que retienen partículas y compuestos disueltos. Paralelamente, se aplican técnicas de oxidación, como la aireación, que transforman el manganeso disuelto en partículas sólidas susceptibles de ser filtradas. Complementando estos procesos, se utiliza permanganato de potasio (KMnO_4) para inducir una precipitación controlada del Mn a través de reacciones redox, asegurando una eliminación efectiva y estable.

Un aspecto innovador de este diseño es la aplicación del tratamiento antes de la etapa de bombeo. Este enfoque evita que el agua con altas concentraciones de manganeso ingrese a la red, lo que reduce significativamente la dureza del recurso. Como resultado, se previenen problemas como incrustaciones en las tuberías y sedimentaciones en los estanques de almacenamiento, prolongando la vida útil de la infraestructura y disminuyendo los costos de mantenimiento. Además, al incorporar agua ya tratada a la red, se optimiza la calidad del recurso y se garantiza un servicio más sostenible.

Para garantizar el diseño adecuado del sistema, es fundamental realizar un análisis de la calidad del agua cruda. Este estudio debe incluir no solo la concentración inicial de manganeso, sino también parámetros como el pH y la dureza del agua. Asimismo, se consideran las condiciones climáticas de la zona, ya que factores como la temperatura o las lluvias estacionales pueden influir en la eficacia del tratamiento.

- Aspectos Operativos

Los trabajadores y la capacitación de estos son aspectos cruciales para el buen funcionamiento de la planta de abatimiento. Es necesario disponer de personal calificado y proporcionarle los conocimientos requeridos. Esto garantiza que los operadores y técnicos estén aptos para el manejo de los equipos y procesos de la planta. Además, es esencial establecer procedimientos estándar de operación y llevar a cabo un mantenimiento preventivo para mantener la eficiencia y la fiabilidad del sistema.

Cabe destacar que es de suma importancia el tener sistemas de monitoreo en tiempo real que den la posibilidad de controlar continuamente los niveles de manganeso en el agua tratada. Esto permite que se cumplan los estándares de calidad y que cualquier imprevisto pueda ser corregido de manera inmediata. Asimismo, se debe tener un plan de contingencia con protocolos claramente definidos para manejar situaciones de emergencia o fallos del sistema, garantizando así la seguridad y la continuidad de la operación de la planta.

- Aspectos Ambientales

Los residuos generados corresponden a lodos metálicos provenientes de la precipitación química del manganeso en forma de óxidos, en los cuales se puede encontrar la presencia de otros metales como hierro, cobre o zinc. Estos lodos pueden clasificarse como peligrosos de acuerdo al DS N°148/2003, lo que requeriría un manejo, transporte y disposición en instalaciones autorizadas. Además de las aguas residuales del lavado de filtros, las cuales contienen sólidos suspendidos o restos de agentes oxidantes provenientes del proceso. También pueden presentarse emisiones de gases por lo que se exigen sistemas de ventilaciones y control de emisiones.

Como en Chile el recurso hídrico es escaso y el entorno es particularmente sensible, es fundamental ser eficientes al momento de hablar del uso del agua, implementando medidas, como a la recirculación, que busquen aprovecharla al máximo. Asimismo, hay que evitar la infiltración de contaminantes hacia los acuíferos o la descarga en cuerpos receptores sin cumplir con el DS°90/2000, normativa asociada a este tipo descargas. Por lo que se habilitan piscinas o estanques de acumulación impermeabilizados para controlar estos residuos antes de su disposición final. Se debe seguir con las leyes ambientales porque en caso de generar impactos significativos, el proyecto ingresa al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y se puede, hasta, suspender el funcionamiento de la obra.

6.5 Diseño de línea de conducción paralela

- Aspectos técnicos

La línea de conducción corresponde a una similar a la ya existente, es decir con su misma extensión y con un diámetro de 600 mm., pero de un material de HDPE en lugar de hierro dúctil con la finalidad tener un buen comportamiento frente a las incrustaciones, evitar corrosión y cualquier tipo de crecimiento biológico dentro de las paredes internas de la red. Asegurando, también, una mayor facilidad al momento de instalación ya que las tuberías de este material son livianas y flexibles, lo que permite disminuir de forma significativa los costos en etapa de construcción.

Durante la instalación, es necesario realizar pruebas de nivelación de la red, así como pruebas de presión y estanqueidad para asegurar la integridad del sistema. Además, se deben integrar válvulas y accesorios para control de aire y desagüe, optimizando así el rendimiento operativo y la gestión del sistema a lo largo de su vida útil.

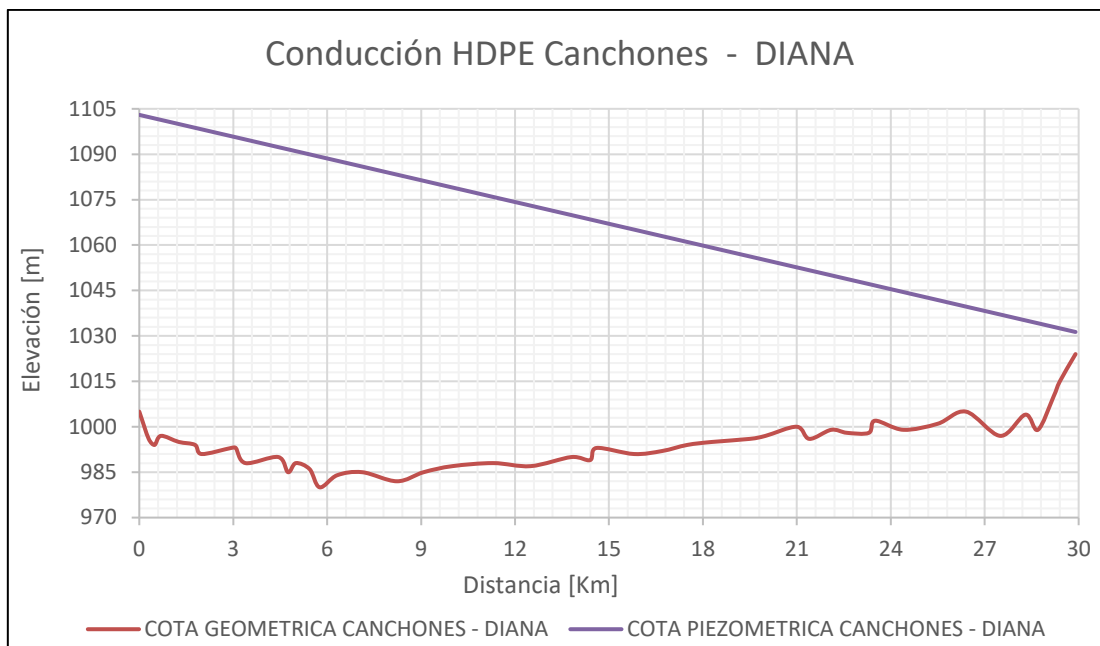


Figura 6-5: Línea Piezométrica conducción HDPE. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6-5 se puede visualizar que una red de HDPE cumple con las condiciones hidráulicas para transportar agua desde Canchones hasta Diana sin mayores problemas. Cabe destacar que el material debe soportar una presión de hasta 98 [mca] por lo que el material debe cumplir con este criterio.

- Aspectos Operativos

La presencia de dos líneas de conducción entre Canchones y Diana con un diseño similar permite establecer un sistema de operación alternada: mientras una línea mantiene el suministro activo, la otra puede someterse a mantenimiento preventivo o a una limpieza sin necesidad de interrumpir el suministro del servicio. Previene la necesidad de cortes programados y con ello disminuyendo los riesgos de acumulación de incrustaciones en la red y de sedimentos en los estanques. Cabe destacar la infraestructura será capaz de mantener su capacidad de respuesta incluso durante eventos críticos, consolidando un servicio confiable y adaptado a demandas futuras.

Se debe tener un sistema de monitoreo capaz de detectar fugas o cualquier tipo de anomalía en la red, además de personal capacitado con protocolos de mantenimiento y respuesta a emergencias, teniendo el control ante cualquier contingencia imprevista.

- Aspectos Ambientales

Se consideran piscinas para acumular todos los desechos que puedan ser extraídos de la limpieza de la línea que se encuentre inactiva, las técnicas de saneamiento pueden variar ya que el funcionamiento en paralelo permite tener un período prolongado de tiempo para realizar dicha tarea. Estas construcciones estarán a disposición para que los desechos no entren en contacto directo con el ecosistema, en caso de aplicar un tipo de limpieza mecánica estas piscinas no sufren ningún tipo de modificación. En caso de utilizar métodos de limpieza químicos se debe seguir el reglamento sobre condiciones sanitaria y ambientales en los lugares de trabajo (DS N° 594/1999), el cual indica que se deben tener piscinas receptoras con barreras de retención y cubiertas impermeables para evitar derrames o que entren en contacto con otras sustancias que puedan generar reacciones, por lo que las piscinas se verían modificadas.

Independientemente del método de limpieza que se utilice, se debe seguir las disposiciones del DS N°148/2003, que establece el reglamento sanitario para el manejo de residuos peligrosos. Este reglamento define criterios como la corrosividad, toxicidad, inflamabilidad y reactividad, entre otros, los cuales permiten clasificar las aguas residuales como "peligrosas" o "no peligrosas". Con base en esta clasificación, se deben determinar las acciones adecuadas para su manejo y disposición.

6.6 Diseño para la limpieza por tramos

- Aspectos técnicos

La línea actual, compuesta por 29,9 km de tubería de hierro dúctil de 600 mm. de diámetro, se divide en tres tramos para facilitar su limpieza mediante "pigs". Estos dispositivos eliminan eficazmente incrustaciones y sedimentos de las paredes internas de la red, utilizando el propio caudal circulante como medio de propulsión.

La implementación de este sistema de limpieza requiere la instalación estratégica de lanzadores y receptores de "pigs". Estas estructuras especializadas, acopladas directamente a la tubería principal, cumplen una función dual: servir como puntos controlados de inserción y recuperación de los dispositivos. Su diseño contempla una distribución cada 10 km aproximadamente a lo largo de los tres tramos del trazado Canchones-Diana, permitiendo limpiezas segmentadas y alternadas evitando cortes de suministros prolongados (ver Figura 6-6). Para la instalación de estos accesos, se debe emplear la técnica de hot tapping, que permite realizar conexiones en la tubería presurizada sin cortar el suministro hídrico. Dada la intervención física en el sistema, es imperativo realizar previamente un análisis de impacto estructural que evalúe cómo afectan las perforaciones a la integridad de la red. Complementariamente, la selección del tipo de "pig" debe optimizarse según las condiciones específicas de la tubería (diámetro, material y grado de sedimentación).

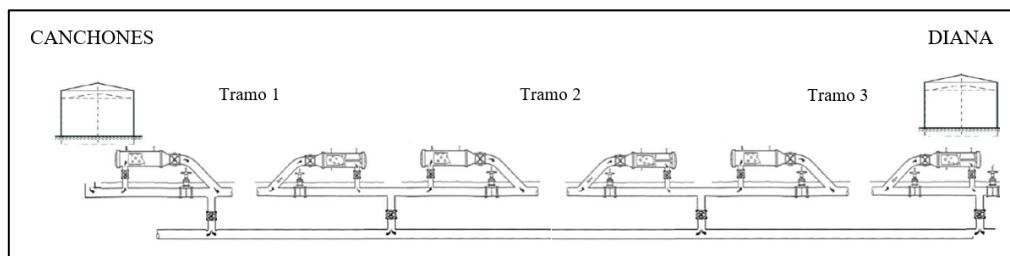


Figura 6-6: Esquema limpieza por tramos. Fuente: *Elaboración propia.*

- Aspectos Operativos

Se debe establecer un calendario detallado para minimizar cualquier interrupción en el servicio de agua potable durante las actividades de limpieza. Además, de llevar a cabo una coordinación estrecha con las autoridades locales para obtener los permisos necesarios y asegurar el cumplimiento de las normativas vigentes. El personal debe ser capacitado en el manejo del sistema de "pigging" y en procedimientos de emergencia, asegurando así una ejecución segura y eficiente del proyecto. Asimismo, se debe desarrollar un plan de contingencia detallado para gestionar posibles emergencias que puedan surgir durante la operación. Estas medidas garantizan no solo la efectividad del proceso de limpieza, sino también la seguridad y la integridad del sistema de distribución de agua en la región.

- Aspectos Ambientales

Se consideran piscinas de recolección en los puntos de recepción de “pigs”, estas estructuras cumplen la función de capturar y contener aguas residuales durante la extracción de este, las cuales suelen presentar altas concentraciones de sedimentos arrastrados desde el interior de la tubería. Posteriormente, estas aguas deben ser analizadas según normativa chilena del Ministerio de Salud (MINSAL), específicamente el DS N°148/2003 el cual establece un reglamento sanitario sobre el manejo de residuos peligrosos, el que a través de parámetros como corrosividad, toxicidad, reactividad, etc. que permite clasificar las aguas como "peligrosas" o "no peligrosas". Esta clasificación es elemento determinante para su gestión posterior. Identificar correctamente el estatus de peligrosidad es crucial para definir si las aguas pueden ser tratadas y reutilizadas de manera segura (por ejemplo, en procesos industriales o riego controlado, previo tratamiento adecuado) o si, por el contrario, requieren un plan de manejo especial como residuo peligroso, asegurando su disposición final en cumplimiento de la ley.

7 Evaluación de alternativas

Una vez definidos los aspectos para cada una de las alternativas de intervención, se valora cada uno de ellos según su adaptación en el contexto del proyecto, buscando integrar el valor económico de cada opción con los aspectos cualitativos indicados en el capítulo anterior.

7.1 Costeo de Alternativas

Para las estimaciones económicas, se utiliza el informe final del “Estudio de determinación de tarifas 2013-2018” de Aguas del Altiplano S.A., en el cual selecciona el tipo de obra que mejor se ajusta a cada una de las alternativas de intervención descritas. Posteriormente, lleva los costos a unidades de fomento (UF), realiza la conversión a valores actualizados y obtiene así una estimación representativa del costo actual. Cabe destacar que la valorización del informe se presenta respecto a la unidad de la UF del 31 de diciembre año 2011 que corresponde a \$22.294,03 y será llevada al valor de la UF del 30 de abril del 2025 correspondiente a \$39.075,41.

Cada una de las estimaciones asociadas a la valorización de las alternativas se identificará en millones (M=1.000.000) y su valor final se hará en miles de millones (MM=1.000.000.000)

La primera de valorización se realiza de forma general, ya que corresponde a infraestructura de evacuación de aguas residuales, la cual debe estar presente en cada una de las alternativas. Del informe tarifario, en la sección de “PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS LAGUNAS AIREADAS” se encuentra la “LAGUNAS AIREADAS POZO ALMONTE (TF), COD 74466, correspondiente a lagunas de evaporación, con un volumen de 3.500 m³, cubiertas por geomembranas para evitar la infiltración del agua depositada. En términos de este estudio, solo se requerirán los valores de inversión de Obras Civiles y de Tuberías y Accesorios, ya que los equipos electromecánicos y las instalaciones eléctricas no aplican para la finalidad en los casos de análisis.

Valores 31 diciembre del 2011:

Obras Civiles: \$ 348M
Tuberías y accesorios: \$ 37M
Equipos: \$ 0
Instalaciones eléctricas: \$ 0

Valores 30 abril del 2025:

Obras Civiles: \$ 609M
Tuberías y accesorios: \$ 65M
Equipos: \$ 0
Instalaciones eléctricas: \$ 0

Lo cual da un total de \$ 674M, correspondiente al valor de cada piscina receptora. Al a este se le agrega un 30% que contempla los costos reales de inversión actuales y da como valor final \$ 876M

7.1.1 Valorización sistema de abatimiento de manganeso en etapa de producción

Entre las infraestructuras consideradas en el informe tarifario, en la sección de “PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE: PLANTA COMPACTA” se encuentra la “PTAP Abatidora AS El Carmelo (ADIC AS 0.01 mg/L)”, COD 76676, correspondiente a la planta de abatimiento de arsénico Santa Rosa. Esta planta tiene un caudal de diseño de 220 L/s y opera mediante procesos de filtración, similares a los utilizados para el tratamiento de manganeso (Mn). Al formar parte del mismo sistema, se considera que cumple con las especificaciones requeridas en cuanto al volumen de agua tratada, por lo que las estimaciones se realizan en base a sus características.

Valores 31 diciembre del 2011:

Obras Civiles: \$ 1.093M
Tuberías y accesorios: \$ 171M
Equipos: \$ 1.045M
Instalaciones eléctricas: \$ 0,21M

Valores 30 abril del 2025:

Obras Civiles: \$ 1.916M
Tuberías y accesorios: \$ 299M
Equipos: \$ 1.831M
Instalaciones eléctricas: \$ 0,36M

Lo cual da un total de \$ 4.413M, al que se le agrega un 30% que contempla los costos reales de inversión actuales y da un valor \$ 5.737M. Además, se contempla la construcción de dos piscinas destinadas al almacenamiento de desechos, con el fin de enfrentar posibles imprevistos durante la etapa de operación. Esta medida representa una inversión adicional de \$ 1.753M.

El costo total estimado para la ejecución completa de esta obra asciende a \$ 7.490M (\$7,5MM).

7.1.2 Valorización línea de conducción paralela

Para el análisis de esta alternativa de intervención se realiza un cálculo del valor por metro de tubería, por lo que, en el informe tarifario, específicamente en la sección “CONDUCCIONES DE AGUA POTABLE: EN PRESIÓN” se encuentra “ALIMENTADORA NORTE (DIST)” COD 74863, el cual corresponde a una red de distribución del sistema Iquique- Alto Hospicio-Pozo Almonte, y que cumple con el diámetro de la actual red que une Canchones con Diana el cual es de 600 mm. tiene una extensión de 412 m. y es de material HDPE PN 10, lo que quiere decir que es capaz de soportar hasta 100 mca de presión. Para realizar la estimación monetaria se trabaja con los montos de inversión totales:

Valores 31 diciembre del 2011:

Obras Civiles: \$ 22M
Tuberías y accesorios: \$ 94M
Equipos: \$ 0,37M
Instalaciones eléctricas: \$ 0M

Valores 30 abril del 2025:

Obras Civiles: \$38M
Tuberías y accesorios: \$164M
Equipos: \$0,65M
Instalaciones eléctricas: \$0M

Lo cual da un total de \$203M, por lo que el valor de cada metro de tubería de HDPE PN10 corresponde a \$ 0,50M. Según los requerimientos se desea cubrir una extensión de 29.9 Km. por ende el valor de la obra es \$ 14.728M, al que se le agrega un 30% que contempla los costos reales de inversión actuales y da un valor de \$ 19.146M

Para el almacenamiento de los desechos generados durante un proceso la limpieza, se proyecta la construcción de tres piscinas. Estas estructuras están diseñadas para contener la totalidad del volumen de agua correspondiente al tramo Canchones-Diana, estimado en aproximadamente 8.500 m³. Esta medida implica una inversión adicional de \$ 2.629M.

En consecuencia, el costo total estimado para la ejecución de esta intervención asciende a \$ 21.776M (\$21,8MM).

7.1.3 Valorización limpieza por tramos

En la minuta técnica referente al análisis sobre el abatimiento de manganoso (PSA N°107334), proporcionada por Aguas del Altiplano, se extraen los costos de inversión asociados a una cotización realizada por la empresa “Duct Cleaning” en el cual entrega los siguientes costos de inversión para una limpieza con dispositivos “pigs” e instalación de lanzadores y receptores considerando 2 tramos. Estos son:

Suministros: \$ 964M

Instalación y prueba: \$ 258M

Obras Civiles: \$ 339M

Otras Obras: \$ 234M

Dando un total de \$1.795M. Utilizando este valor correspondiente a dos tramos, se obtiene el monto asociado a la implementación de tres tramos, obteniendo \$2.692M. Como la realización de esta cotización fue realizada en la actualidad, no se multiplicará por un factor como en las otras estimaciones económicas. Otro dato para considerar existe un costo asociado de \$19M por cada vez que se realice una limpieza mediante estos dispositivos “pigs”.

En cuanto a la valorización del hot tapping, desde Aguas del Altiplano se informa que tiene un valor aproximado de 3000 UF, la cual llevada a la UF del 30 de abril del 2025 da un valor de \$117M, y considerando las 4 perforaciones necesarias para llevar a cabo el sistema mostrado en la Figura 6-6, da un valor de \$469M.

Se requiere la construcción de tres piscinas receptoras ubicadas al final de cada tramo, destinadas a contener los residuos y los “pigs” utilizados durante el proceso de limpieza. Estas estructuras están diseñadas para recibir el agua desechada, y su implementación representa una inversión estimada de \$2.629M.

Por lo tanto, el costo total estimado considerando una única intervención de limpieza asciende a \$5.809M (\$5,8MM).

7.2 Metodología de evaluación

Este análisis se realiza en base a los principios heurísticos adaptados a los cuatro aspectos fundamentales del proyecto: técnico, operativo, ambiental y económico.

En el presente estudio se desarrolla una estrategia metodológica que permite discernir entre diversas alternativas capaces de dar solución a una problemática específica, destacando aquella que presenta un mejor desempeño integral en los ámbitos técnico, operativo, económico y ambiental. La forma en que estos ámbitos se relacionan entre sí, así como la relevancia que se le otorga a cada uno, depende directamente del caso de estudio y de los recursos que la empresa responsable esté dispuesta a destinar. En este contexto, el Índice de Evaluación Global (IEG) se presenta como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones; sin embargo, su determinación responde a una apreciación subjetiva, ya que la asignación de puntajes a cada alternativa depende exclusivamente del criterio de quien realiza la evaluación. Esto se debe a que la escala de valoración se construye en función de la percepción del comportamiento de cada alternativa en los distintos ámbitos evaluados. Por lo tanto, el IEG puede verse modificado según los intereses de la empresa y/o la urgencia de llevar a cabo una solución.

Los aspectos técnicos, operativos y ambientales de cada alternativa propuesta son evaluados mediante una escala numérica del 1 al 7. Esta metodología permite comparar el desempeño relativo de las opciones en cada uno de estos ámbitos.

La escala de puntaje está definida por:

Fiabilidad y factibilidad técnica – constructiva (aspecto técnico) :

- 7: *Cumple totalmente, es óptima técnica y constructivamente, incluso con ventajas en tiempo y recursos de construcción.*
- 6: *Cumple muy bien, construcción simple, riesgos mínimos.*
- 5: *Cumple bien, factible de construir con medios y tecnologías habituales.*
- 4: *Cumple lo básico, construcción posible con control de riesgos moderados.*
- 3: *Cumple parcialmente, factible solo con modificaciones importantes o tecnologías poco disponibles.*
- 2: *Cumple muy poco, requiere rediseños y presenta serias dificultades constructivas.*
- 1: *No cumple normas ni estándares, ni es factible de construir en condiciones actuales.*

Facilidad Operativa y continuidad de suministro (aspecto operativo):

- 7: *Operación muy intuitiva, sin cortes perceptibles de suministro.*
- 6: *Operación simple, prácticamente sin afectar el suministro.*
- 5: *Operación sencilla, con cortes poco frecuentes y de corta duración.*
- 4: *Operación medianamente sencilla, cortes moderados y controlables.*
- 3: *Operación aceptable, pero genera interrupciones prolongadas durante su uso.*
- 2: *Operación difícil, requiere personal altamente especializado, cortes frecuentes.*
- 1: *Muy compleja, frecuentes errores y cortes extensos de suministro.*

Impacto Ambiental (aspecto ambiental):

- 7: *Impacto ambiental positivo, incluso aporta beneficios ecológicos directos.*
- 6: *Impacto mínimo, promueve mejoras ambientales indirectas.*
- 5: *Bajo impacto, buena alineación con normativa y buenas prácticas.*
- 4: *Impacto bajo, cumple normativa vigente.*
- 3: *Impacto moderado, cumple solo lo mínimo.*
- 2: *Impacto negativo relevante, mitigaciones muy costosas.*
- 1: *Alto impacto negativo, no cumple con normativa.*

Posteriormente los puntajes/notas obtenidas se relacionan con el costo económico total asociado a la implementación de cada alternativa, lo que permite obtener un Índice de Evaluación Global (IEG) y con ello facilitar la toma de decisiones. Cabe mencionar que la alternativa que posea el menor IEG será la alternativa más favorable.

$$IEG = \frac{\text{Valor Económico (en MM)}}{(\text{Ptje Técnico} + \text{Ptje Operativo} + \text{Ptje Ambiental})}$$

Se considera el enfoque económico como el elemento de mayor influencia en el puntaje final porque representa la viabilidad real de llevar a cabo una alternativa. Un excelente proyecto, en términos técnicos y ambientales, carece de factibilidad si sus costos de inversión y operación superan lo razonable de un presupuesto.

Dividir el valor económico en suma de los demás aspectos implica que una alternativa con bajos costos y buena relación costo-beneficio podrá potenciar su evaluación global, mientras que una solución con costos muy altos reducirá su puntaje final, aun cuando su desempeño técnico, operativo o ambiental sea superior.

Este enfoque busca dar prioridad a las alternativas que logran un adecuado equilibrio entre la calidad técnica, sostenibilidad operativa-ambiental y la factibilidad económica, privilegiando aquellas que sean implementables de forma eficiente dentro del marco de los recursos disponibles.

7.3 Evaluación de Alternativas

La aplicación práctica de la formulación propuesta se realiza para las alternativas levantadas en el caso de Canchones en los siguientes apartados.

7.3.1 Evaluación sistema de abatimiento de manganeso en etapa de producción

- Técnico – Nota 3

La solución implica una infraestructura compleja, que requiere estructuras metálicas, instalaciones eléctricas, equipos especializados y sistemas de tratamiento que son difíciles de montar y mantener en un entorno desértico. Además, la sensibilidad de sus componentes a altas temperaturas y polvo del desierto, sumado a la necesidad de servicios permanentes como energía, agua y químicos, refuerza sus limitaciones constructivas. Además, no aborda las incrustaciones ya existentes en la red, lo que limita su efectividad en el corto plazo.

- Operativo – Nota 5

Al tratar el agua antes de ingresar a la red, se previene el riesgo de interferencias en el suministro de agua, su operación puede mantenerse estable con los protocolos adecuados.

- Ambientales – Nota 5

El manejo de residuos está bien definido, con sistemas de contención y tratamiento que cumplen con la normativa vigente. Aunque se generan lodos metálicos y emisiones, estos pueden ser controlados con infraestructura adecuada. La eficiencia hídrica y el cumplimiento ambiental son alcanzables si se implementan medidas de control.

7.3.2 Evaluación de una línea de conducción paralela

- Técnico – Nota 3

La construcción de una nueva línea de 29.9 km representa un desafío logístico y técnico considerable. Requiere transporte de materiales, maquinaria pesada, obras lineales extensas y coordinación territorial.

- Operativo – Nota 6

La operación alternada entre ambas líneas permite realizar mantenimientos sin afectar el suministro, lo que da mayor robustez al sistema. Esta flexibilidad operativa es de alta relevancia en una zona que posee una única fuente de abastecimiento. Además, permite planificar limpiezas sin interrupciones.

- Ambientales – Nota 3

La limpieza de una tubería de gran longitud implica el manejo de grandes volúmenes de agua residual. Aunque se contempla la construcción de piscinas de contención, el riesgo ambiental aumenta por la escala del sistema. La gestión de residuos debe ser rigurosa para evitar impactos en acuíferos o suelos.

7.3.3 Evaluación de limpieza por tramos mediante dispositivos *pig*

- Técnico – Nota 6

Es una obra de complementaria a la línea existente, lo que simplifica el proceso constructivo y con ello la logística que conlleva. El método pigging es eficiente, adaptable al diámetro de la tubería y permite limpieza segmentada. La técnica de hot tapping facilita la instalación sin cortes de suministro, lo que reduce riesgos estructurales.

- Operativo – Nota 4

Durante la limpieza, se requiere detener el suministro hacia los estanques, operando con reservas limitadas. Esto exige una coordinación precisa entre los tiempos de limpieza y la autonomía de los estanques. Aunque es viable, presenta riesgos si no se gestiona adecuadamente.

- Ambientales – Nota 4

Debido a los tramos, el volumen de residuos es menor y localizado, lo que facilita su tratamiento. Si se aplican medidas de control y clasificación según normativa, el impacto ambiental es bajo. La técnica permite una gestión eficiente sin comprometer el entorno.

7.3.4 Comparación de resultados

Se procede a calcular la puntuación final de cada una de las alternativas, cuya evaluación se resume en la Tabla 7-1: Tabla resumen de puntuación de alternativas propuestas

$$IEG \text{ sistema de abatimiento de manganeso} = \frac{7,5}{(3 + 5 + 5)} = 0,58$$

$$IEG \text{ línea de conducción paralela} = \frac{21,8}{(3 + 6 + 3)} = 1,82$$

$$IEG \text{ limpieza a tramos mediante pig} = \frac{5,8}{(6 + 4 + 4)} = 0,41$$

Tabla 7-1: Tabla resumen de puntuación de alternativas propuestas

Aspectos para evaluar	Sistema de abatimiento de Mn en etapa de producción	Línea de conducción paralela	Limpieza por tramos mediante dispositivos “pigs”
Fiabilidad y factibilidad técnica	3	3	6
Facilidad operativa y continuidad de suministro	5	6	4
Impacto ambiental	5	3	4
Valor económico (MM)	7,5	21,8	5,8
IEG	0,58	1,82	0,41

Luego de analizar las tres alternativas propuestas para mejorar el sistema de agua potable del tramo Canchones–Diana, considerando criterios técnicos, operativos, económicos y ambientales, se establece un orden de preferencia en función de lo más favorable para este contexto específico del sistema:

- 1) Limpieza por tramos mediante pigging
- 2) Sistema de abatimiento de manganoso en etapa de producción
- 3) Construcción de una línea paralela

8 Propuesta final y conclusiones

En el presente estudio se desarrolla una estrategia metodológica que permite discernir entre diversas alternativas capaces de dar solución a una problemática específica, destacando aquella que presenta un mejor desempeño integral en los ámbitos técnico, operativo, económico y ambiental. La forma en que estos ámbitos se relacionan entre sí, así como la relevancia que se le otorga a cada uno, depende directamente del caso de estudio y de los recursos que la empresa responsable esté dispuesta a destinar. En este contexto, el Índice de Evaluación Global (IEG) se presenta como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones; sin embargo, su determinación responde a una apreciación subjetiva, ya que la asignación de puntajes a cada alternativa depende exclusivamente del criterio de quien realiza la evaluación. Esto se debe a que la escala de valoración se construye en función de la percepción del comportamiento de cada alternativa en los distintos ámbitos evaluados. Por lo tanto, el IEG puede verse modificado según los intereses de la empresa y/o la urgencia de llevar a cabo una solución.

8.1 Caso Alto Hospicio

El caso base aborda la búsqueda de una solución a la problemática generada por la presencia de manganoso en el sistema de producción de agua potable, específicamente en la línea de conducción de Alto Hospicio. A partir de la información recopilada y su contexto, se prioriza una alternativa que permita una implementación económicamente eficiente. En este sentido, una vez determinado el IEG, se identifica que la limpieza por tramos mediante dispositivos “pigs” resulta ser la intervención más conveniente en la línea de conducción que conecta los sectores de Canchones y Diana. Esta medida se complementa con un plan de mantenimiento periódico y un monitoreo continuo de la calidad del agua y del estado interno de la tubería. Esta solución no solo permite eliminar las incrustaciones existentes, sino que también optimiza la operación del sistema al reducir los riesgos de turbiedad y fallas estructurales.

En cuanto al funcionamiento del sistema, y considerando la evidencia técnica disponible, se recomienda programar una limpieza de la red al menos una vez al año, con el objetivo de prevenir la acumulación de incrustaciones y garantizar un óptimo rendimiento hidráulico. Asimismo, se sugiere implementar un plan de monitoreo semestral tanto para la red como para los estanques de Diana, a fin de detectar oportunamente la presencia de sedimentos u otros depósitos. La identificación de dichos sedimentos constituye un indicador claro de la necesidad de activar el procedimiento de limpieza, evitando así que se generen obstrucciones o disminuya la calidad del agua distribuida. Idealmente, tanto el proceso de limpieza como la perforación y el acoplamiento de nuevas piezas deben ser ejecutados por empresas subcontratadas con experiencia en estos procedimientos. Esto garantiza una correcta implementación de los mecanismos, especialmente considerando que el flujo de agua debe detenerse temporalmente. Dicho intervalo no debe exceder el tiempo de autonomía del sistema, por lo que la coordinación y eficiencia del trabajo son fundamentales para evitar interrupciones en el suministro.

Durante el proceso de limpieza, el agua turbia extraída de la red es depositada en las piscinas de rescate. Se recomienda establecer una gestión adecuada que permita su reutilización, una opción viable es la incorporación de esta al proceso minero, considerando que, a 80 kilómetros hacia la cordillera, desde la zona de estudio, se encuentra una faena minera Cerro Colorado donde esta agua podría ser útil en la etapa de molienda, que se caracteriza por un elevado consumo hídrico y donde su uso contribuiría a optimizar los recursos disponibles.

8.2 Otros escenarios en un sistema de producción de agua

Con los antecedentes recopilados del caso de Alto Hospicio y la aplicación de la metodología del Índice de Evaluación Global (IEG), es posible analizar situaciones que involucren la toma de decisiones frente a problemáticas en diversos escenarios, permitiendo una gestión eficiente y la prevención de complicaciones mayores.

Es fundamental estudiar cada situación de forma particular, ya que las prioridades en los distintos ámbitos varían según las características técnicas de la red, el entorno, la cantidad de clientes, las necesidades de la empresa, entre otros factores. Todos estos elementos influyen directamente en la

definición del IEG, el cual permite determinar la alternativa que mejor se ajusta a las condiciones del caso. Para el escenario de un sistema de agua que se encuentra en operación y requiere mantenimiento sin interrumpir la continuidad del suministro, una de las opciones que suele perfilarse como más adecuada es la instalación de una línea paralela, que permita realizar mantenimientos de manera alternada. No obstante, su factibilidad depende de la extensión del tramo a replicar y de los recursos económicos disponibles por parte de la empresa. Generalmente se optaría por una medida de intervención que permita realizar una limpieza la red a través del método que más se ajuste a las características de esta. Cabe destacar que las inversiones se justifican cuando la problemática alcanza un punto crítico, momento en el cual la solución se vuelve prioritaria y el aspecto económico pasa a un segundo plano, lo que también puede modificar la formulación del IEG.

Al abordar el diseño de nuevos sistemas de conducción, una opción eficiente para mitigar problemas como las incrustaciones y la acumulación de sedimentos en la red, es el uso de tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE). Este material se caracteriza por su baja rugosidad interna y su alta resistencia a la corrosión, lo que favorece un flujo hidráulico más eficiente y reduce significativamente el riesgo de obstrucciones. Adicionalmente, el HDPE presenta ventajas económicas frente a otras alternativas, como el hierro dúctil, al ser más liviano y fácil de manipular. Esto permite facilitar su instalación y disminuir los requerimientos de maquinaria y personal especializado, optimizando así los recursos del proyecto.

En caso de que el diseño contemple un sistema de limpieza en la línea, es fundamental incorporar desde el inicio el equipamiento necesario, ya que esto permite optimizar los recursos disponibles y simplificar la logística durante la etapa de construcción. Es decir, si se considera la implementación de limpieza mediante dispositivos “pigs”, es recomendable tener en cuenta desde la fase de diseño la inclusión de lanzadores y receptores. De este modo, se evitan intervenciones posteriores como el hot tapping y los costos asociados a la habilitación de nuevas faenas de construcción.

En escenarios donde la empresa responsable no cuenta con los recursos necesarios, o por diversas razones opta por implementar medidas de mitigación temporales en lugar de soluciones de fondo ante problemáticas sanitarias, se incrementa significativamente el riesgo de enfrentar dificultades técnicas y operacionales. Esto evidencia la necesidad de mantener un equilibrio entre los criterios considerados en la metodología propuesta mediante el Índice de Evaluación Global (IEG). Una alternativa económica no siempre resulta ser la más conveniente si descuida aspectos técnicos o ambientales, ya que podría comprometer el funcionamiento adecuado de la red y la entrega del suministro ante cualquier imprevisto. Esta situación, además, puede derivar en sanciones para la empresa y afectar negativamente su reputación por no haber anticipado ni gestionado de forma adecuada dichos eventos.

9 Referencias

- Aguas del Altiplano. (2018). *Actualización Planes de Desarrollo de Alto Hospicio*.
- Aguas del Altiplano. (2020, Octubre 17). *El desafío de producir y distribuir agua potable en el desierto*. https://www.aguasdelaltiplano.cl/noticia_239-257_el-desafio-de-producir-y-distribuir-agua-potable-en-el-desierto-201017191232
- Altiplano Aguas del. (2024). Minuta técnica: Análisis sobre el abatimiento de manganeso – Conducción Sistema Canchones–Diana–Santa Rosa (PSA N°107334). Informe interno.
- Center for Climate and Resilience Research [CR2]. (2024, Diciembre). *Seguridad hídrica en Chile: Caracterización y perspectivas de futuro*. https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2023/12/Informe_Seguridad_HidricaCR2.pdf
- Contreras, J., (2023). *Incrustaciones en los sistemas de abastecimiento de agua potable. Formación y métodos de inhibición. Bases de la ciencia*. 8(2). 49-67. <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v8i2.5851>
- Corporation, C. I. (s.f.). Tuberías de Hierro Ductil y Conexiones. <https://www.ecomexperu.com/CNBM%20Catalogo%20de%20Tuberias%20y%20Conexiones.pdf>
- Crabtree, M., Eslinger, D., Fletcher, P., Miller, M., Jhonson, A., King, G. (1999) *La lucha contra las incrustaciones - Remoción y prevención*. *Oilfield Review*. 11(3), 30-49
- EnggCyclopedia. (s.f.). *Pipeline pigging*. <https://enggcyclopedia.com/2011/07/pigging/>
- Gonzalez, E. (2017). *Formación y desarrollo de biofilm: su impacto en los sistemas de abastecimiento y distribución de agua potable*. [Tesis Postgrado, Universidad Nacional de la Plata]. Repositorio UNLP. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66667>
- Hasan, S., & Ali, M. A. (2010). Occurrence of manganese in groundwater of Bangladesh and its implications on safe water supply. *J Civ Eng*, 32(2), 121-128.
- Instituto Nacional de Normalización (2005). *Calidad del agua* (NCh409/1.Of.2005).
- Pennstate Extension. (2023, Enero 10). *Hierro y Manganeso en Sistemas de Agua Privados*. <https://extension.psu.edu/hierro-y-manganeso-en-sistemas-de-agua-privados>
- Polypipe Plastics. (s.f.) *Tubería de Polietileno de alta densidad (HDPE) vs Hierro Dúctil*. <https://polypipeplastics.com/wp-content/uploads/2023/03/HDPE-vs-Hierro-Ductil.pdf>
- Quarini G, Ainslie E, Herbert M, et al. (2010). Investigation and development of an innovative pigging technique for the water-supply industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 224(2):79-89
- Rojas, F. (2008). *Lavado de redes de agua potable, Aplicabilidad en Chile*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio UCH. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103084>
- Superintendencia de Servicios Sanitarios [SISS]. (2009, Septiembre). *Boletín Aguas Claras*. https://www.siss.gob.cl/appsiss/historico/articles-7835_recurso_1.pdf
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). (2023). *Informe de gestión del sector sanitario*. https://www.siss.gob.cl/586/articles-23289_recurso_1.pdf
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). (2023, Febrero 10). *SISS abre investigación para determinar responsabilidades de Aguas del Altiplano por extenso corte de servicio en Alto Hospicio*. <https://www.siss.gob.cl/586/w3-article-22780.html>
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). (2018). *Estudio determinación de tarifas 2013-1018 Aguas del Altiplano*. https://www.siss.gob.cl/586/articles-9222_est_tar.pdf
- Subdirección Nacional de Geología. (2017). *Hidrogeología de la cuenca de la Pampa del Tamarugal*

- United States Geological Survey [USGU]. (2018, Junio 11). *Warness of wáter*. https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/hardness-water?qtscience_center_objects=0#qt-science_center_objects
- Valencia, Y. (2003, 13 de Marzo). Tras 5 días sin agua potable: Aguas del Altiplano informa que 100% del servicio está repuesto. *Biobio Chile*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-tarapaca/2023/02/13/tras-5-dias-sin-agua-potable-aguas-del-altiplano-informa-que-100-del-servicio-esta-repuesto.shtml>
- Wagner, M. S. (2015). *Estudio Hidrogeoquímico De La Aguas Subterráneas Del Sector Norte De La Cuenca Pampa Del Tamarugal, Entre Latitud 19°S Y 20°S, I Región De Tarapacá, Chile*. [Memoria para optar a título, Departamento de Geología, Universidad de Chile]. Repositorio UChile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132938>