

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
SANTIAGO – CHILE



EVALUACIÓN DE PROCESOS PARA EL ABATIMIENTO DE LOS  
EFECTOS DE LA DUREZA EN EL AGUA POTABLE DEL SISTEMA  
IQUIQUE – ALTO HOSPICIO

Memoria de titulación presentada por  
FELIPE MARCHANT MELLADO

Como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Civil

Profesor Guía  
Alberto Kresse Zamorano

Profesora Co-referente  
Vivian Aranda Núñez

Enero 2021

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, debo agradecer a mis padres Andrea y Ricardo, quienes con su esfuerzo me entregaron el nivel de educación que me permitió entrar a estudiar esta desafiante carrera. Ellos, en conjunto con mis hermanos Andrés y Consuelo, me brindaron su constante apoyo y certeza de que podía, puedo, y podré sacar este u otro desafío que me propusiera, inyectándome de una confianza que a veces vi debilitada. Agradecimientos también a mis sabi@s; tía bisabuela Nina, abuela Cú, mi abuelita Cota, mi infinito tata Sergio (alcanzaste a darme los primeros empujoncitos tata querido), y a mis tíos y primos, por sus palabras de ánimo y consejos.

En cuanto al proceso dentro de la universidad, me sobran palabras de agradecimientos, ya que este, además de entregarme una sólida base generalista, me llenó de personas por las cuales agradecer. Cada saludo, cada risa, cada partido de fútbol, cada arenga antes de los certámenes, y el respectivo carrete posterior, le daban dulzor a la amargura que a veces nos rodeaba en la exigencia.

Como no agradecer también a los funcionarios dentro de la universidad, de sonrisa fácil y ánimo que contagiaban en momentos difíciles. Aquí destaco al equipo de porteros y guardias de seguridad, los que siempre, sin falta, al llegar y al partir, me recomendaban que me cuidara en la bicicleta, que era muy tarde, que prendiera las luces...que me titulara. Gracias a todos.

Este trabajo sin duda también va en nombre de mis amigos, tanto de la vida como sansanos, que constantemente me animaban a lograr esta meta, y a los que no alcanzo a nombrar de a uno, pero destaco; al histórico “Chico Terry F.C. (“Piruláticos Lais” del ISM), al gran “Directorio” (amigos de una tal uchile), “Emeterios” (sansanos mezclados, con flamantes sedes 914B y 1104), ensayos con “Alturas del Imalaya” (películas), al gran “Unión Civil F.C.”, a mi hermano tatitayaya Diego, las charlas con Johanzon y Mezita, los mates con Pichón, las incursiones laborales con el Flaco, las imitaciones con el Yeye, y la presencia infinita de nuestro ángel amigo Tomi. SALU!

Gracias totales Camila Díaz, tus ánimos constantes, tu cariño, tu apoyo y tu luz en momentos de oscuridad, forman parte importante del proceso de cierre de esta memoria. Ahora a seguirnos acompañando en los caminos que vengan, pero por el momento estaré para devolverte la mano y apoyarte en lo que necesites...ahora te toca a ti. “VAMOH CHILENOS!”

Todos los profesores también forman parte importante de este proceso, y a quienes también agradezco por su espíritu docente y generoso, donde destaco al profe Alberto, que permitió que este trabajo de título fuera posible, además de guiarme y acompañarme dentro del proceso, durante el cual aprendí mucho a través de su experiencia.

Agradecerte a ti que estás leyendo estas palabras, y en el caso de que estés comenzado este proceso de memoria, recomendarte que lo disfrutes como el último desafío de tu carrera, independiente del tiempo que te podrías llegar a demorar (no te demores tanto sipo...).

## DEDICATORIA

*A mi Madre,  
Andrea Loreto Mellado Calderón*

*A mi Padre,  
Ricardo Hernán Marchant Ramírez*

*...a su apoyo incondicional.*

## RESUMEN

La dureza del agua es un indicador asociado a la presencia de compuestos minerales y se determina, en Chile, a partir de la concentración de sales de magnesio y calcio. El agua denominada “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en pocas cantidades.

Por las características geográficas del norte de Chile, la mayoría de las fuentes de agua potable corresponden a sondajes que captan aguas altamente mineralizadas y con altos niveles de dureza. La presencia de distintas sales en estas fuentes hace que su potabilización requiera de variados tipos de tratamientos, sin embargo, en la mayoría de los casos, dichos procesos no reducen los niveles de dureza ya que, al ser inofensiva para la salud, no se encuentra normada en el país.

De hecho, la norma de agua potable, si bien considera parámetros referidos a la percepción sensorial del producto, como el olor, sabor y color, no contempla los efectos visuales asociados al uso del agua, como es el caso de la dureza, cuya presencia genera residuos, manchas e incrustaciones de sarro en artefactos sanitarios y electrodomésticos. Esta condición afecta la percepción de calidad del agua potable por parte de los usuarios.

Desde hace unos años, la industria sanitaria ha enfocado su gestión en la satisfacción de sus clientes, incluso mediante la prestación de servicios a niveles superiores a los normados. En este contexto, es de su interés evaluar los costos de abatimiento de la dureza o la incorporación de técnicas para mitigar sus efectos.

Es así, como el objetivo general del presente trabajo de título, es analizar la conveniencia de mitigar los efectos de la dureza en el agua potable suministrada a las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, y el impacto que podría generar en la percepción y en la tarifa de los usuarios de estos sistemas.

Palabras Claves: dureza del agua, percepción del cliente, mitigación de efectos, agua potable, industria sanitaria, tratamiento de agua potable, innovación.

## **ABSTRACT**

Water hardness is an indicator associated with the presence of mineral compounds and is determined, in Chile, from the concentration of magnesium and calcium salts. The so-called "hard" water has a high concentration of these salts and the "soft" water contains them in small quantities.

Due to the geographical characteristics of northern Chile, most of the drinking water sources correspond to water drillings that capture highly mineralized waters with high levels of hardness. The presence of different salts in these sources means that its purification requires various types of treatments, however, in most cases, these processes do not reduce hardness levels since, being harmless to health, it is not found regulated in the country.

In fact, the drinking water standard, although it considers parameters related to the sensory perception of the product, such as smell, taste and color, does not contemplate the visual effects associated with the use of water, such as hardness, whose presence generates residues, stains and scale incrustations in sanitary ware and electrical appliances. This condition affects the perception of drinking water quality by users.

For some years now, the sanitary industry has focused its management on customer satisfaction, including through the provision of services at levels higher than those regulated. In this context, it is in your interest to evaluate the costs of abatement of hardness or the incorporation of techniques to mitigate its effects.

Thus, as the general objective of this paper is to analyze the convenience of mitigating the effects of hardness in the drinking water supplied to the cities of Iquique and Alto Hospicio, and the impact that it could generate on perception and cost to users of these systems.

**Keywords:** water hardness, customer perception, mitigation of effects, drinking water, sanitary industry, drinking water treatment, innovation.

## GLOSARIO

- AC: Agua Cruda; agua que no ha recibido ningún tratamiento, y que generalmente se encuentra en fuentes y reservas naturales de aguas superficiales y subterráneas.
- ADA: Aguas del Altiplano S.A.
- A.In.: Anualidad de la Inversión.
- AI (Adequate Intake): Ingesta adecuada; es una estimación de la ingesta de nutrientes promedio para un grupo o grupos de personas sanas dentro de una edad, etapa y/o grupo de género designado. Se deriva de la ingesta observada de individuos aparentemente sanos en el grupo de interés. Los valores de AI se establecen cuando no hay datos suficientes para derivar un EAR, como en el caso del calcio.
- ANC: Aguas no contabilizadas; Las aguas no contabilizadas corresponden a las pérdidas de agua en las obras de agua potable, tales como fugas en las redes, imprecisiones en la macromedición y en la medición domiciliaria, consumos operacionales, consumos de incendio, usos indebidos.
- A.Op.: Anualidad de la Operación.
- AP: Agua Potable.
- AS: Agua Servida.
- CAPEX: Contracción del inglés “capital expenditure” (“gasto de capital” en español), se define como las inversiones de capital que crean beneficios, que para el presente trabajo de título resulta equivalente a los costos de inversión.
- CDMC: Coeficiente del día de máximo consumo en el mes de máximo consumo; cociente entre el consumo máximo diario y el consumo medio diario del mes de mayor consumo. El valor mínimo de CDMC es 1,1.
- CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; unidad de Saneamiento Básico del Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental (SDE) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), está dedicado a temas especializados de cooperación técnica con los países en saneamiento ambiental básico.
- CMMC: Coeficiente del mes de máximo consumo; cociente entre el consumo máximo mensual y el consumo medio mensual.
- EAR (Estimated Average Requirement): Requisito promedio estimado, es el valor de ingesta de nutrientes que se estima cumple con el requisito definido por un indicador específico de adecuación en el 50% de los individuos, en una etapa de la vida o grupo de género.
- FDMC: Factor del día de máximo consumo; producto entre el coeficiente del mes de máximo consumo (CMMC) y el coeficiente del día de máximo consumo en el mes de máximo consumo (CDMC).
- I.I.: Intercambio Iónico (tratamiento abatidor de dureza).
- INE: Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.

- Inocuidad: Incapacidad de hacer daño.
- IQQ-AH: Iquique y Alto Hospicio.
- ISN: Índice de Satisfacción Neta; se refiere al porcentaje de encuestados que califican con notas 6 y 7, menos el porcentaje que califican con notas de 1 a 4 (para una metodología de encuesta, con notas de 1 a 7).
- N.: Nanofiltración (tratamiento abatidor de dureza).
- NBI: Nuevas Bases de Infraestructura.
- NCh409/1.Of2005: Norma Chilena de “Agua Potable – Parte 1 – Requisitos”, oficial desde su publicación, en el año 2006.
- OMS: Organización Mundial de la Salud; organismo de la Organización de Naciones Unidas (ONU), especializado en gestionar políticas de prevención, promoción e intervención en salud a nivel mundial.
- OPS: Organización Panamericana de la Salud; agencia especializada en salud del Sistema Interamericano y sirve como la oficina regional para las Américas de la OMS, siendo la organización internacional especializada en salud pública de las Américas.
- OPEX: Contracción del inglés “operational expenditures” (“gastos operativos” en español), se define como el costo permanente para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema, que para el presente trabajo de título resultan equivalentes a los costos de operación.
- Organoléptico: Que puede ser percibido por los órganos de los sentidos.
- P.C.: Precipitación con Cal (tratamiento abatidor de dureza).
- PEAP: Planta Elevadora de Agua Potable.
- PT: Planta de Tratamiento.
- PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable.
- PTAS: Planta de Tratamiento de Agua Servida.
- Roca (definición geológica): sólido cohesionado que está formado por uno o más minerales.
- S.A.E.: Sistema Antical Electrónico (tratamiento abatidor de los efectos de la dureza).
- S.D.M.: Sistema Desincrustante Magnético (tratamiento abatidor de los efectos de la dureza).
- SIFAC: Sistema de Información de Facturación y Cobertura de la SISS, que contiene información de consumos, producción y clientes de AP.
- SII: Servicio de Impuestos Internos.
- SISS: Superintendencia de Servicios Sanitarios.
- TC: referente a la alternativa de Tratamiento Centralizado.
- TD: referente a la alternativa de Tratamiento Disperso.
- TIR: Tasa Interna de Retorno.
- VAC: Valor Actual de Costos.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	Objetivos generales .....	3
1.2	Objetivos específicos .....	3
1.3	Alcances .....	3
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES GENERALES</b> .....	<b>5</b>
2.1	Sobre la calidad de servicio de Agua Potable .....	5
2.1.1	Encuesta de Percepción de clientes, SISS [19].....	8
2.1.2	Encuesta de Satisfacción Global, Aguas del Altiplano .....	14
2.1.3	Informe de Gestión Sector Sanitario .....	17
2.1.4	Calidad del agua potable en el Norte de Chile .....	18
2.2	Norma Chilena de Agua Potable .....	21
2.3	La dureza del agua.....	25
2.3.1	Origen y formación .....	26
2.3.2	Tipos de dureza .....	28
2.3.3	Clasificaciones .....	29
2.3.4	Otras unidades.....	32
2.3.5	Determinación .....	32
2.3.6	Estudios sobre los efectos para la salud .....	33
2.3.7	Efectos asociados al uso de las aguas duras .....	41
2.3.8	Normativas internacionales .....	43
2.3.9	La dureza en Chile .....	44
2.4	Sistema de producción de Aguas del Altiplano .....	48
2.4.1	Sistema Iquique – Alto Hospicio.....	49
2.4.2	Población Abastecida .....	54
<b>3</b>	<b>DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>55</b>
3.1	Relación entre el ISN y la concentración de dureza en Chile .....	55
3.2	Caracterización del Agua Potable de Aguas del Altiplano.....	57
3.2.1	Tipo de Fuente.....	57
3.2.2	Calidad y dureza del agua, XV y I Región .....	57
3.2.3	Calidad y dureza del agua, IQQ-AH .....	61
3.3	Dureza Objetivo .....	62
<b>4</b>	<b>PROCESOS ABATIDORES DE LOS EFECTOS DE LA DUREZA</b> .....	<b>63</b>
4.1	Tipos de procesos .....	63
4.1.1	Tratamientos Básicos .....	64
4.1.2	Tratamientos Avanzados .....	66
4.1.3	Tratamientos No Convencionales .....	70
<b>5</b>	<b>PROPUESTA Y PLAN DE TRABAJO</b> .....	<b>76</b>

5.1	Ventajas y desventajas de los tratamientos abatidores .....	78
5.2	Selección de tratamientos a evaluar .....	79
6	<b>DIMENSIONAMIENTO DE TRATAMIENTOS SELECCIONADOS .....</b>	<b>80</b>
6.1	Alternativas de aplicación de los tratamientos.....	80
6.2	Caudal de distribución - Sistema IQQ-AH.....	83
6.3	Porcentaje de caudal a tratar.....	86
6.3.1	Tratamiento del tipo Convencional .....	86
6.3.2	Tratamiento del tipo No Convencional .....	88
6.4	Magnitud de los caudales a ser tratados .....	89
6.4.1	Caudal a Tratar – No Convencional – T. Centralizado .....	89
6.4.2	Caudal a Tratar – No Convencional – T. Disperso.....	90
6.4.3	Caudal a Tratar – Convencional – T. Centralizado .....	91
6.4.4	Caudal a Tratar – Convencional – T. Disperso .....	92
6.5	Comentarios generales.....	92
7	<b>ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LAS ALTERNATIVAS.....</b>	<b>93</b>
7.1	Metodología .....	93
7.2	Costos Tratamientos Convencionales.....	93
7.2.1	Costos – Precipitación con Cal (P.C.) .....	93
7.2.2	Costos – Nanofiltración (N.) .....	95
7.2.3	Costos – Intercambio Iónico (I.I.) .....	97
7.3	Costos Tratamientos No Convencionales.....	100
7.3.1	Costos – Sistema Antical Electrónico, VULCAN (S.A.E.).....	100
7.3.2	Costos – Sistema Desincrustante Magnético, VOSGES (S.D.M.) .....	103
7.4	Resumen de Costos .....	107
7.4.1	CAPEX de los tratamientos.....	107
7.4.2	OPEX de los tratamientos .....	107
7.4.3	Anualidad de la Inversión .....	108
7.4.4	Anualidad de la Operación .....	110
7.4.5	Costos Totales a Largo Plazo Neto, Reales (CTLPN_R) .....	111
7.5	Estimación del eventual Impacto Tarifario .....	112
7.5.1	Supuestos y consideraciones generales .....	113
7.5.2	Metodología .....	113
7.5.3	Caudal de distribución – Sistema IQQ-AH, “Empresa Modelo” .....	114
7.5.4	Caudal a Tratar – No Convencional – T. Centralizado, “Empresa Modelo” .....	115
7.5.5	Caudal a Tratar – No Convencional – T. Disperso, “Empresa Modelo” .....	116
7.5.6	Caudal a Tratar – Convencional – T. Centralizado, “Empresa Modelo” .....	117
7.5.7	Caudal a Tratar – Convencional – T. Disperso, “Empresa Modelo” .....	117
7.5.8	Resumen de Caudales de Diseño.....	118
7.5.9	Resumen de Costos “Empresa Modelo” .....	118
7.5.10	Variación Tarifaria (VT) .....	121

7.5.11	Costos para la Empresa Sanitaria .....	123
<b>7.6</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>124</b>
<b>8</b>	<b><i>EVALUACIÓN PRÁCTICA Y PRUEBA PILOTO DE ALTERNATIVA DESINCRUSTANTE.....</i></b>	<b><i>125</i></b>
<b>8.1</b>	<b>Evaluación práctica; Criterio y selección .....</b>	<b>125</b>
8.1.1	Consideraciones para su Implementación .....	125
<b>8.2</b>	<b>Prueba Piloto de alternativa desincrustante.....</b>	<b>127</b>
<b>8.3</b>	<b>Metodología de la Prueba Piloto.....</b>	<b>128</b>
8.3.1	Consideraciones para su Implementación .....	128
8.3.2	Consideraciones y procedimiento de la prueba .....	131
8.3.3	Instalación del sistema AIV .....	132
8.3.4	Instalación de hervidores.....	132
8.3.5	Consideraciones adicionales .....	133
<b>8.4</b>	<b>Resultados de Prueba Piloto principal.....</b>	<b>133</b>
8.4.1	Incrustación en hervidores .....	133
8.4.2	Incrustación en grifería.....	138
8.4.3	Gráficos de parámetros controlados .....	138
<b>8.5</b>	<b>Resultados de pruebas y procedimientos adicionales .....</b>	<b>139</b>
<b>8.6</b>	<b>Comentarios.....</b>	<b>139</b>
<b>9</b>	<b><i>CONCLUSIONES.....</i></b>	<b><i>140</i></b>
<b>9.1</b>	<b>Conclusiones generales .....</b>	<b>140</b>
<b>9.2</b>	<b>Respecto de la Prueba Piloto.....</b>	<b>142</b>
<b>9.3</b>	<b>Comentarios Finales .....</b>	<b>143</b>
<b>10</b>	<b><i>REFERENCIAS .....</i></b>	<b><i>145</i></b>
<b>11</b>	<b><i>ANEXOS.....</i></b>	<b><i>152</i></b>
<b>11.1</b>	<b>ANEXO A; “División territorial” .....</b>	<b>152</b>
<b>11.2</b>	<b>ANEXO B; “Escala de evaluación” .....</b>	<b>153</b>
<b>11.3</b>	<b>ANEXO C; “Cálculo ISN” .....</b>	<b>153</b>
<b>11.4</b>	<b>ANEXO D; “Detalle catastro de dureza, Memoria M. Neira” .....</b>	<b>154</b>
<b>11.5</b>	<b>ANEXO E; “Sistemas de producción de ADA” .....</b>	<b>154</b>
11.5.1	Aguas del Altiplano Arica .....	154
11.5.2	Aguas del Altiplano Iquique.....	157
<b>11.6</b>	<b>ANEXO F; “Proyecciones de Población” .....</b>	<b>164</b>
<b>11.7</b>	<b>ANEXO G; “ISN%, Dureza y Precio”.....</b>	<b>166</b>
<b>11.8</b>	<b>ANEXO H; “Calidad del Agua Cruda – XV Región” .....</b>	<b>166</b>
<b>11.9</b>	<b>ANEXO I; “Calidad del Agua Cruda – I Región” .....</b>	<b>169</b>

<b>11.10</b>	<b>ANEXO J; “Localidades catastradas con dureza”</b> .....	<b>171</b>
<b>11.11</b>	<b>ANEXO K; “Catastro de dureza en Iquique”</b> .....	<b>172</b>
<b>11.12</b>	<b>ANEXO L; “Reacciones Químicas de Procesos Ablandadores”</b> .....	<b>172</b>
11.12.1	Precipitación con Cal.....	172
11.12.2	Intercambio iónico.....	173
11.12.3	Evaporación-condensación.....	173
<b>11.13</b>	<b>ANEXO M; “Proyección de Demanda”</b> .....	<b>173</b>
<b>11.14</b>	<b>ANEXO N; “Caudal Total de Diseño”</b> .....	<b>180</b>
<b>11.15</b>	<b>ANEXO Ñ; “Porcentajes y Caudales a tratar”</b> .....	<b>182</b>
<b>11.16</b>	<b>ANEXO O; “CAPEX; Precipitación con Cal”</b> .....	<b>183</b>
<b>11.17</b>	<b>ANEXO P; “Costos Directos de Operación y Mantención”</b> .....	<b>185</b>
<b>11.18</b>	<b>ANEXO Q; “OPEX; Precipitación con Cal”</b> .....	<b>186</b>
11.18.1	OPEX PT físico químico Convencional OPEX C.: .....	186
11.18.2	OPEX por Agregados Químicos para la precipitación con cal OPEX Q.: .....	193
11.18.3	OPEX por manejo y disposición de Lodos (OPEX L.). .....	197
<b>11.19</b>	<b>ANEXO R; “CAPEX; Nanofiltración”</b> .....	<b>202</b>
<b>11.20</b>	<b>ANEXO S; “OPEX; Nanofiltración”</b> .....	<b>204</b>
<b>11.21</b>	<b>ANEXO T; “CAPEX; Intercambio Iónico”</b> .....	<b>206</b>
11.21.1	Porcentajes C.INF., P. con Cal Modificada*” .....	206
<b>11.22</b>	<b>ANEXO U; “OPEX; Intercambio Iónico”</b> .....	<b>207</b>
11.22.1	OPEX tratamiento Equivalente por Cliente (OPEX E.C.).....	207
11.22.2	OPEX transporte y disposición de Lodos (OPEX L.) .....	214
11.22.3	OPEX Servicios de Operación y mantención (OPEX O.) .....	215
<b>11.23</b>	<b>ANEXO V; “Costos Sistema Antical Electrónico”</b> .....	<b>218</b>
11.23.1	CAPEX; Estimación según PEAP de Gran Caudal .....	218
11.23.2	CAPEX .....	218
11.23.3	OPEX .....	219
<b>11.24</b>	<b>ANEXO W; “Costos Sistema Desincrustante Magnético”</b> .....	<b>220</b>
11.24.1	Estimación de Capacidad de Caudal según Catálogo .....	220
11.24.2	CAPEX .....	220
<b>11.25</b>	<b>ANEXO X; “Valorización de CAPEX para Intercambio Iónico”</b> .....	<b>221</b>
<b>11.27</b>	<b>ANEXO Y; “CAPEX Anualizados; Todos los tratamientos”</b> .....	<b>222</b>
<b>11.28</b>	<b>ANEXO Z; “Costo Total a Largo Plazo Teórico”</b> .....	<b>224</b>
<b>11.29</b>	<b>ANEXO AA; “CAPEX de Empresa Modelo”</b> .....	<b>227</b>
<b>11.30</b>	<b>ANEXO AB; “OPEX de Empresa Modelo”</b> .....	<b>229</b>
<b>11.31</b>	<b>ANEXO AC; “Determinación de la Demanda Anual Actualizada Q*”</b> .....	<b>232</b>

<b>11.32</b>	<b>ANEXO AD; “Tasa Interna de Retorno”</b>	<b>233</b>
<b>11.33</b>	<b>ANEXO AE; “Imagen línea de Agua Potable”</b>	<b>234</b>
<b>11.34</b>	<b>ANEXO AF; “Resultados de pruebas y procedimientos adicionales”</b>	<b>234</b>
11.34.1	Limpieza preliminar de hervidores	234
11.34.2	Reporte de hervidor antiguo	234
11.34.3	Avance parcial de desincrustación en grifería del sector de tratamiento	235
11.34.4	Residuos del hervidor del laboratorio	235
11.34.5	Limpieza de grifería	235
11.34.6	Test de hervidores	236
11.34.7	Limpieza de hervidores	236
11.34.8	Test de Espuma	236
11.34.9	Test de sabor	236
11.34.10	Índice de Langelier (IL)	237
11.34.11	Conductividad eléctrica	237
<b>11.35</b>	<b>ANEXO AG; “Informe Final Prueba Piloto Acelerador Iónico”</b>	<b>238</b>

## FIGURAS

Figura 2.1: Distribución del agua existente en el planeta, detallando la distribución del agua dulce. Fuente: Boletín Aguas Claras N°20, SISS, septiembre 2006. ....	19
Figura 2.2: Esquema del proceso general de disolución de minerales que determinan la dureza. Fuente: Elaboración propia. ....	26
Figura 2.3: Niveles de dureza del agua potable a nivel comunal en Chile. Fuente: Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de Caso: Chile. Marco Antonio Neira Gutiérrez, 2006.46	46
Figura 2.4: Distribución de la dureza del agua potable, de las comunas de la región metropolitana de Santiago de Chile. Fuente: Vigaflow S.A.; <a href="https://vigafloWSA.blogspot.com/2016/08/mapa-del-agua-con-sarro-en-la-dureza.html?view=timeslide">https://vigafloWSA.blogspot.com/2016/08/mapa-del-agua-con-sarro-en-la-dureza.html?view=timeslide</a> . ....	48
Figura 2.5: Localización geográfica de la Región de Tarapacá, respecto al territorio continental chileno. Fuente: Google Maps.....	49
Figura 2.6: De izquierda a derecha, vista simplificada y vista satelital ampliada, de la Región de Tarapacá (delimitada en rojo), destacando puntualmente el sector donde se encuentra Iquique y Alto Hospicio. Fuente: Google Maps. ....	50
Figura 2.7: Vista satelital de las áreas que abarcan las localidades del Iquique y Alto Hospicio. Fuente: Google Maps. ....	50
Figura 2.8: Diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de IQQ-AH. Porcentaje de clientes abastecidos, según los clientes totales de la localidad referida (información facilitada por ADA, actualizada al 06/07/18). *Posee otra conducción en paralelo, de 29,7 [km] (distancias presentadas son proporcionales al valor). Fuente: Elaboración Propia.....	53
Figura 4.1: Algunos tipos de Aceleradores Iónicos NEW ARA, y sus características técnicas principales. Fuente: Elaboración propia, en base a información facilitada por los proveedores en Chile.....	72
Figura 4.2: Esquema ilustrativo de instalación del sistema DESINCAL. Fuente: <a href="https://www.desincal.com/">https://www.desincal.com/</a> .....	74
Figura 4.3: Modelo para aplicación doméstica, del aparato Antical RF. Fuente: <a href="https://descalcificador10.com/#comprar_un_sistema_antical_rf">https://descalcificador10.com/#comprar_un_sistema_antical_rf</a> .....	74
Figura 5.1: Esquema general del desarrollo del plan de trabajo del presente estudio. Fuente: Elaboración Propia. ....	77
Figura 6.1: Extracto del diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de IQQ-AH, referente al Tratamiento Centralizado (distancias presentadas no proporcionales al valor). Fuente: Elaboración Propia. ....	81
Figura 6.2: Extracto del diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de IQQ-AH, referente al Tratamiento Disperso (distancias presentadas no proporcionales al valor). Fuente: Elaboración Propia. ....	82
Figura 6.3: Esquema de la determinación de la proyección de facturación anual, tanto para Iquique como para Alto Hospicio. Fuente: Elaboración Propia.....	83
Figura 6.4: Esquema de distintos caudales, necesarios para el diseño sanitario del estudio. Fuente: Elaboración Propia. ....	84
Figura 6.5: Esquemas de implementación de las distintas aplicaciones de los tratamientos Convencionales, en el sistema IQQ-AH. Fuente: Elaboración Propia. ....	88

Figura 6.6: Esquemas de implementación de las distintas aplicaciones de los tratamientos No Convencionales, en el sistema IQQ-AH. Fuente: Elaboración Propia. .... 89

Figura 8.1: Plano de planta de las instalaciones del laboratorio, destacando el lugar donde se instala el equipo AIV, y el lugar donde se controla de calidad de dicha agua. Fuente: Elaboración propia. .... 129

Figura 11.1: Diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de Arica, donde los cilindros hacen referencia a recintos de estanques, los rectángulos WTP son PTAP, los círculos con triángulos azules en el centro son PEAP, las gotas son sectores de producción de AP, y los enrejados son los distintos sistemas de distribución. Fuente: Elaboración de ADA. .... 157

Figura 11.2: Diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de Iquique, Alto Hospicio Pozo Almonte y La Huayca, donde los cilindros hacen referencia a recintos de estanques, los rectángulos WTP son PTAP, los círculos con triángulos azules en el centro son PEAP, las gotas son sectores de producción de AP, y los enrejados son los distintos sistemas de distribución. Fuente: Elaboración de Aguas del Altiplano. .... 163

Figura 11.3: Esquema ilustrativo de las distancias entre las localidades catastradas con dureza, en la Región de Tarapacá. Fuente del mapa: [www.maps.google.cl](http://www.maps.google.cl). Elaboración propia del esquema. .... 171

## TABLAS

Tabla 2.1: Límites de elementos y parámetros según normativas de calidad para aguas potables y minerales de Chile. ....	6
Tabla 2.2: Extracto de los resultados de la memoria “El Agua que bebemos” de Giuseppe Bonatici [10], de cada una de las 10 muestras de agua mineral, de distintas marcas. Se destacan concentraciones que sobrepasen límites normados por la NCh409.....	6
Tabla 2.3: Elementos esenciales presentados en la norma NCh409/1.Of2005, en su “Tabla 1”.....	22
Tabla 2.4: Parámetros relativos a características organolépticas presentados en la norma NCh409/1.Of2005, en su “Tabla 7”.....	23
Tabla 2.5: Requisitos generales de aguas destinadas a vida acuática presentados en la norma NCh1333.Of78, en su “Tabla 4”.....	24
Tabla 2.6: Cationes divalentes causantes de dureza, y sus respectivos aniones con los que reaccionan, destacando en negrita los controlados por la NCh409/1.Of2005. ....	25
Tabla 2.7: Clasificación de la dureza del agua, considerada por la Organización mundial de la Salud. ....	30
Tabla 2.8: Clasificación de la dureza del agua, considerada por la Asociación de Calidad de Agua. ....	30
Tabla 2.9: Clasificación de la dureza del agua, considerada por Jairo R. ....	30
Tabla 2.10: Propuesta de clasificación de la dureza para aguas chilenas, por Marco A. Neira Gutiérrez, en su memoria de titulación de nombre “Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile.”.....	31
Tabla 2.11: Recomendaciones internacionales de ingestas diarias de calcio y magnesio ( <sup>a</sup> hombre/mujer). Traducido de [41]. ....	34
Tabla 2.12: Concentración promedio de calcio en las aguas potables de algunas ciudades del mundo, y algunas regiones de Chile. Destacar que se muestra el promedio regional chileno máximo y mínimo, de la III y la IX Región respectivamente.....	35
Tabla 2.13: Contenido de calcio en líquidos y alimentos. *Considera concentración media general de aguas mundiales, de 50 [mg/l].....	35
Tabla 2.14: Concentración promedio de magnesio en las aguas potables de algunas ciudades del mundo, y algunas regiones de Chile. Destacar que se muestra el promedio regional chileno máximo y mínimo, de la III y la XI Región respectivamente.....	37
Tabla 2.15: Alimentos de mayor concentración de magnesio, y su respectiva cantidad por cada 100 [gr] de este. ....	37
Tabla 2.16: Concentraciones máximas permisibles de dureza (como CaCO <sub>3</sub> ), Calcio y Magnesio, según distintas normativas.....	43
Tabla 2.17: Promedio de dureza total en cada una de las regiones de Chile, según estudio de Marco Neira, y su clasificación. ....	44
Tabla 2.18: Comunas de Chile, que poseen un agua potable con dureza mayor a 500 [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]. ....	47
Tabla 2.19: Porcentajes de clientes abastecidos de AP por sector, en Iquique, luego de realizar la parcelación correspondiente del Sector Centro-Norte. ....	54

Tabla 2.20: Resumen de las Proyecciones de Clientes y Población abastecida, para cada una de las localidades, y también para la totalidad del sistema IQQ-AH en estudio. Para más detalles, ver ANEXO F; “Proyecciones de Población”.....	54
Tabla 3.1: Concentraciones de parámetros de importancia en el AC, de las fuentes de la XV Región. Para el AC, en color rojo las concentraciones promedio que sobrepasan el límite normativo, y para el agua tratada, en color verde, su cumplimiento. ....	58
Tabla 3.2: Concentraciones de parámetros de importancia en el AC, de las fuentes de la I Región. Para el AC, en color rojo las concentraciones promedio que sobrepasan el límite normativo, y para el agua tratada, en color verde, su cumplimiento. ....	58
Tabla 3.3: Catastro de concentración de dureza total, en donde se utilizaron datos de magnesio entre 2003 y 2004, desde la SISS. Algunos datos de magnesio, calcio y dureza total, desde la Dirección de Obras Hidráulicas y de la Dirección General de Aguas. ....	58
Tabla 3.4: Concentraciones de dureza total máxima, promedio y mínima, para cada una de las 4 localidades de la I Región, mediante los datos de los 121 puntos de muestra. ....	59
Tabla 3.5: Concentraciones de dureza cálcica máxima, promedio y mínima, para cada una de las 4 localidades de la I Región, mediante los datos de los 82 puntos de muestra. ....	59
Tabla 3.6: Concentraciones promedio de parámetros de importancia en el AC de los sondajes fuentes de los sistemas que abastecen a IQQ-AH. En color rojo, las concentraciones promedio que sobrepasan el límite normativo, mostrado en la última columna. ....	61
Tabla 3.7: Concentraciones promedio de parámetros de importancia en el agua tratada, para los sistemas que abastecen a IQQ-AH. Se destaca en color verde, las concentraciones promedio que cumplen el estándar normativo, mostrado en la última columna. ....	61
Tabla 3.8: Concentraciones de dureza total y cálcica máxima, promedio y mínima, para la localidad de Iquique de la I Región. Catastro de dureza cálcica solo en los estanques de distribución. ....	62
Tabla 4.1: Características principales de los procesos de membrana más comunes de tratamiento de agua (PM = Peso Molecular en [gr/mol]. *de arriba abajo los elementos retenidos que se van acumulando. **retiene parcialmente las moléculas de bajo peso). ....	67
Tabla 5.1: Ventajas y desventajas de los tratamientos abatidores de los efectos de la dureza del AP. Prob. V/D = Probabilidad de ser elegido por sus Ventajas (V) / por sus Desventajas (D). ....	78
Tabla 6.1: Significado de las siglas de los caudales a tratar, para el TC. ....	81
Tabla 6.2: Significado de las siglas de los caudales a tratar por sectores de consumo, para el Tratamiento Disperso, y los porcentajes de clientes que posee cada sector, respecto a la totalidad de clientes de Iquique y Alto Hospicio, respectivamente.....	82
Tabla 6.3: Tasas de crecimiento anual de clientes, para cada una de las localidades de estudio, ....	84
Tabla 6.4: Coeficientes y Factores de máximo consumo, determinados con la data de facturación proveniente de la SIFAC II.....	85
Tabla 6.5: Estimación del porcentaje de pérdidas, en la etapa de distribución, para ambas localidades de estudio. ...	85
Tabla 6.6: Caudales máximos diarios de distribución, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referentes al 15vo año de proyección. ....	86

Tabla 6.7: Dureza total estimada a la salida de la PTAP El Carmelo, antes y después de ser tratada, según el porcentaje de caudal. ....	87
Tabla 6.8: Resumen de los porcentajes de caudal a tratar, por PTAP y localidad, para eliminar la dureza, y lograr la dureza objetivo en la mezcla con el porcentaje de caudal no tratado. ....	88
Tabla 6.9: Dureza total estimada para todo el Sistema IQQ-AH, antes y después de ser tratada, según el porcentaje de caudal. ....	88
Tabla 6.10: Porcentaje de tratamiento y pérdidas de caudal, asociados a la PTAP Santa Rosa (Filtros Gravitacionales rápidos). ....	89
Tabla 6.11: Resumen y desglose de los aportes de la PTAP Santa Rosa, a los sistemas de Iquique y Alto Hospicio. ....	90
Tabla 6.12: Resumen del aporte de caudal de cada una de las PTAP que abastecen al sistema de Iquique, y dicha demanda particular, como caudal máximo diario de distribución, para el último año del horizonte de diseño. ....	90
Tabla 6.13: Caudales de diseño para las PT No Convencionales, estimadas aguas abajo de las PTAP existentes, según Figura 6.1. ....	90
Tabla 6.14: Caudales de diseño para las PT No Convencionales, estimadas en cada uno de los puntos presentados en la Figura 6.2. ....	91
Tabla 6.15: Caudales de diseño para las PT Convencionales, estimadas aguas abajo de las PTAP existentes, según Figura 6.1. ....	91
Tabla 6.16: Promedios de dureza total, en Iquique, Alto Hospicio y todo el Sistema IQQ-AH, luego de eliminar la dureza en los caudales tratados, para los 15 años del horizonte de diseño. ....	92
Tabla 6.17: Caudales de diseño para las PT Convencionales, estimadas en cada uno de los puntos presentados en la Figura 6.2. ....	92
Tabla 7.1: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de Precipitación con Cal, mediante distintos tipos de tratamiento. ....	94
Tabla 7.2: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación de Precipitación con Cal. ....	95
Tabla 7.3: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de Nanofiltración, mediante distintos tipos de tratamiento. ....	96
Tabla 7.4: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación de Nanofiltración. ....	97
Tabla 7.5: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de Intercambio Iónico, mediante distintos tipos de tratamiento. ....	98
Tabla 7.6: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación de Intercambio Iónico. ....	99
Tabla 7.7: Capacidad máxima y consumo de energía, de cada uno de los modelos del S.A.E., presentes en el catálogo Se asume su conexión durante 24 [hr], en los 365 días del año. ....	101
Tabla 7.8: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de S.A.E., mediante distintos tipos de tratamiento. ....	102
Tabla 7.9: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación del Sistema Antical Electrónico. ....	103

Tabla 7.10: Modelos, caudales máximos y diámetros, de los equipos S.D.M., presentados por VOSGES en sus catálogos. ....	104
Tabla 7.11: Características técnicas de y de costos, de ambos modelos de acelerador iónico con su filtro respectivo, en conjunto con la aproximación del costo de cada S.D.M. ....	105
Tabla 7.12: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de S.D.M., mediante distintos tipos de tratamiento. ..	106
Tabla 7.13: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación del Sistema Desincrustante Magnético. ....	107
Tabla 7.14: Resumen del CAPEX Total de la aplicación de los distintos tipos de tratamientos, para cada una de las alternativas de aplicación dentro del Sistema IQQ-AH. ....	107
Tabla 7.15: Resumen del OPEX T. de la aplicación de los distintos tipos de tratamientos, como TC dentro del Sistema IQQ-AH. ....	108
Tabla 7.16: Resumen del OPEX T. de la aplicación de los distintos tipos de tratamientos, como TD dentro del Sistema IQQ-AH. ....	108
Tabla 7.17: Vida útil técnica (teórica), recomendada para PTAP, según Anexo “Vidas útiles” del estudio tarifario ADA. ....	109
Tabla 7.18: Vida útil técnica adoptada, para calcular la anualidad de cada tratamiento en estudio. ....	109
Tabla 7.19: Anualidades de las inversiones de cada tipo de tratamiento en estudio. ....	109
Tabla 7.20: CAPEX, costos anualizados y factores de anualidad, de la aplicación de los distintos tratamientos, tanto como TC y TD. ....	110
Tabla 7.21: Anualidad de la Operación, para cada tipo de tratamiento en estudio. ....	111
Tabla 7.22: Costo Total a Largo Plazo Neto, para cada tipo de tratamiento en estudio. ....	111
Tabla 7.23: Caudales máximos diarios de distribución, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referente a los 5 años de proyección. ....	114
Tabla 7.24: Comparación entre los caudales de distribución para el caso de una estimación “real”, y una “modelo”. ....	115
Tabla 7.25: Aportes de la PTAP Santa Rosa, a los sistemas de Iquique y Alto Hospicio, especificando los caudales totales, a la salida y entrada de la planta, y también los caudales perdidos, tratados y no tratados. ....	116
Tabla 7.26: Aporte de caudal de cada una de las PTAP que abastecen al sistema de Iquique, y dicha demanda particular, como caudal máximo diario de distribución, para cada uno de los años del horizonte de diseño. ....	116
Tabla 7.27: Caudales a tratar por sector de Iquique, para un Tratamiento Centralizado. ....	117
Tabla 7.28: Caudales a tratar por sector de Alto Hospicio, para un Tratamiento Disperso. ....	117
Tabla 7.29: Resumen de los caudales de diseño, determinados para la valorización de costos de los tratamientos. ..	118
Tabla 7.30: Resumen del CAPEX M. Total de aplicación de los distintos tipos de tratamientos, para cada alternativa de aplicación. ....	118
Tabla 7.31: Resumen del OPEX M. Total de la aplicación de los tratamientos, para un TC dentro del Sistema IQQ-AH. ....	119
Tabla 7.32: Resumen del OPEX M. Total de la aplicación de los tratamientos, para un TD dentro del Sistema IQQ-AH. ....	119

Tabla 7.33: Anualidades de las inversiones de cada tipo de tratamiento en estudio. ....	119
Tabla 7.34: Anualidades de los OPEX, para cada tipo de tratamiento en estudio, dada su aplicación por una “Empresa Modelo”. ....	119
Tabla 7.35: CTLPN_M para cada tipo de tratamiento en estudio, dada su aplicación por un “Empresa Modelo”....	120
Tabla 7.36: VT estimados, dada la aplicación de los distintos tratamientos en estudio, según 2 alternativas de aplicación. ....	121
Tabla 7.37: Nueva tarifa sanitaria, por la implementación de los tratamientos en estudio, en el sistema IQQ-AH, y el respectivo aumento porcentual que significa dicha tarifa. ....	122
Tabla 7.38: Aumento en la cuenta de AP, a pagar mensualmente, debido a la implementación de los tratamientos en estudio. ....	122
Tabla 7.39: Costos asumidos por la empresa sanitaria, y el porcentaje que representan dichos costos con respecto al CT.ADA. ....	123
Tabla 8.1: Características principales de las líneas de abastecimiento de agua potable independientes. ....	128
Tabla 8.2: Resumen con los promedios de los parámetros controlados durante las 15 semanas de prueba, y el límite normativo respectivo. SDT refiere a la concentración de Sólidos Disueltos Totales. ....	139
Tabla 9.1: Resumen de los resultados obtenidos en el estudio, en cuanto a costos anuales y aumentos mensuales en la cuenta AP. ....	140
Tabla 9.2: Resumen de los resultados obtenidos en el estudio, respecto al costo anual total de cada uno de los tratamientos. ....	141
Tabla 11.1: Clasificación de regiones de Chile, utilizada durante el desarrollo de la memoria de título. ....	153
Tabla 11.2: Escala de evaluación utilizada por la encuesta "Percepción de clientes de la calidad de servicio de las empresas sanitarias 2016". ....	153
Tabla 11.3: Concentraciones de dureza total en Chile, calcio y magnesio, en cuanto a sus promedios, máximos y mínimos regionales. ....	154
Tabla 11.4: Proyecciones de Clientes y Población abastecida, para cada una de las localidades, y también para la totalidad del sistema IQQ-AH en estudio. ....	165
Tabla 11.5: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes del <b>Valle de Azapa</b> , en la XV Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas. ....	167
Tabla 11.6: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes <b>Costero dulce</b> , en la XV Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas. ....	168
Tabla 11.7: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes <b>Ciudad</b> , en la XV Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas. ....	168
Tabla 11.8: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes <b>Valle del Luta</b> , en la XV Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas. ....	169

Tabla 11.9: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes <b>Carmelo</b> , en la I Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.....	169
Tabla 11.10: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes <b>Canchones</b> , en la I Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.....	170
Tabla 11.11: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes <b>Cumiñalla</b> , en la I Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.....	170
Tabla 11.12: Tasas de crecimiento anual de clientes, para cada una de las localidades de estudio, según la información de los Planes de Desarrollo vigentes, en los cuales se utilizan estas tasas, y se asumen constantes en el tiempo.....	177
Tabla 11.13: Caudales medios de consumo, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referente a los 15 años de proyección.....	178
Tabla 11.14: Coeficientes y Factores de máximo consumo, determinados con la data de facturación proveniente de la SIFAC II, y donde el FDMC de cada localidad se calculó mediante la ecuación (11.22). ....	179
Tabla 11.15: Caudales máximos diarios de consumo, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referente a los 15 años de proyección. ....	179
Tabla 11.16: Caudales máximos diarios de distribución, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referente a los 15 años de proyección. ....	180
Tabla 11.17: Aportes de la PTAP Santa Rosa, a los sistemas de Iquique y Alto Hospicio, especificando los caudales totales, a la salida y entrada de la planta, y también los caudales perdidos, tratados y no tratados.....	180
Tabla 11.18: Aporte de caudal de cada una de las PTAP que abastecen al sistema de Iquique, y dicha demanda particular, como caudal máximo diario de distribución, para cada uno de los años del horizonte de diseño.....	181
Tabla 11.19: Caudales a tratar por sector de Iquique, según un TD.....	181
Tabla 11.20: Caudales a tratar por sector de Alto Hospicio, según un TD. ....	182
Tabla 11.21: Porcentajes de caudal a tratar, por PTAP y localidad, para eliminar la dureza y lograr la dureza objetivo en la mezcla, con el porcentaje de caudal no tratado. ....	182
Tabla 11.22: Caudales a tratar, por PTAP y localidad, para eliminar la dureza y lograr la dureza objetivo en la mezcla, con el caudal no tratado. ....	183
Tabla 11.23: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Precipitación con Cal, según el TC.....	185
Tabla 11.24: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Precipitación con Cal, según el TD. ....	185
Tabla 11.25: Peso porcentual de cada componente de los Costos Directos de operación y mantención, de las empresas sanitarias en estudio. ....	186
Tabla 11.26: Resumen de facturación anual media de AP, para cada localidad en estudio y el total del sistema IQQ-AH, en los 15 años del horizonte de diseño. ....	187
Tabla 11.27: Porcentajes de aporte de caudal a la totalidad del sistema IQQ-AH, desde cada una de las PTAP. ....	188
Tabla 11.28: Resumen de facturación de AP estimada, referente al aporte de cada PTAP al sistema IQQ-AH.....	188
Tabla 11.29: Resumen de OPEX anual, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC. ....	189

Tabla 11.30: Resumen de OPEX anual, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD. ....	189
Tabla 11.31: Facturación anual media de AP, para cada localidad en estudio y el total del sistema IQQ-AH, en los 15 años del horizonte de diseño. ....	190
Tabla 11.32: Facturación de AP estimada, referente al aporte de cada PTAP al sistema IQQ-AH. ....	190
Tabla 11.33: OPEX anual, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC. ....	191
Tabla 11.34: OPEX anual, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD. ....	192
Tabla 11.35: Detalle de los OPEX del tipo OPEX C., para la aplicación de la Precipitación con Cal, según los puntos de aplicación del TD, para la localidad de Alto Hospicio. ....	192
Tabla 11.36: Detalle de los OPEX del tipo OPEX C, para la aplicación de la Precipitación con Cal, según los puntos de aplicación del TD, para la localidad de Iquique. ....	193
Tabla 11.37: Concentraciones de compuestos en el agua, en su condición antes y después de tratar, para los compuestos a remover en el tratamiento de precipitación con cal. ....	193
Tabla 11.38: Concentraciones de los compuestos a remover por precipitación con cal, y sus correspondientes concentraciones de agregados químicos necesarios para lograrlo. ....	193
Tabla 11.39: Costos de los agregados químicos de la precipitación con cal al 2018, y su respectiva equivalencia en UF, dado un valor de la UF al 31.12.2018 de \$27.565,79 [CLP]. ....	194
Tabla 11.40: Resumen de los OPEX anuales de A.Q., de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC. ....	194
Tabla 11.41: Resumen de los OPEX anuales de A.Q., de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD. ....	194
Tabla 11.42: Dosis de agregados químicos anuales requeridos, para el tratamiento por precipitación con cal, según la “Aplicación 1”. ....	195
Tabla 11.43: Dosis de agregados químicos anuales requeridos, para el tratamiento por precipitación con cal, según la “Aplicación 2”, tratando los porcentajes de caudal respectivos para cada uno de los puntos de aplicación. ....	195
Tabla 11.44: OPEX anuales de agregados químicos, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC. ....	196
Tabla 11.45: OPEX anuales de agregados químicos, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD. ....	196
Tabla 11.46: Detalle de los OPEX del tipo OPEX Q. para la aplicación de la Precipitación con Cal, en un TD, para la localidad de Alto Hospicio. ....	197
Tabla 11.47: Detalle de los OPEX del tipo OPEX Q., para la aplicación de la Precipitación con Cal, en un TD, para la localidad de Iquique. ....	197
Tabla 11.48: Resumen de los Costos de Transporte y Disposición de Lodos anuales, por la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC. ....	199
Tabla 11.49: Resumen de los Costos de Transporte y Disposición de Lodos anuales, por la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD. ....	199
Tabla 11.50: Volúmenes de producción de lodos anuales, por la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC. ....	199

Tabla 11.51: Volúmenes de producción de lodos anuales, por la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD. ....	200
Tabla 11.52: Costos de Transporte y Disposición de Lodos anuales, por la aplicación de las PT de p. con cal según un TD. ....	200
Tabla 11.53: Costos de Transporte y Disposición de Lodos anuales, por la aplicación de las PT de p. con cal según un TD. ....	201
Tabla 11.54: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de precipitación con cal, como TC. ....	201
Tabla 11.55: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de precipitación con cal, como TD. ....	201
Tabla 11.56: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Nanofiltración, para un TC. ....	204
Tabla 11.57: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Nanofiltración, para un TD. ....	204
Tabla 11.58: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Nanofiltración como TC. ....	205
Tabla 11.59: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Nanofiltración como TD. ....	205
Tabla 11.60: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Intercambio Iónico, para un TC. ....	206
Tabla 11.61: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Intercambio Iónico, para un TD. ....	206
Tabla 11.62: Desglose porcentual de cada una de las partidas que componen los C.INF. de la Precipitación con Cal modificada*, cambiando los porcentajes de costos de Obras Civiles por el de los Equipos Electromecánicos, según un TC. ....	206
Tabla 11.63: Desglose porcentual de cada una de las partidas que componen los C.INF. de la Precipitación con Cal modificada*, cambiando los porcentajes de costos de Obras Civiles por el de los Equipos Electromecánicos, según un TD. ....	207
Tabla 11.64: Resumen de los volúmenes medios tratados por PTAP, y sus respectivas estimaciones de costos por el cambio anual de la resina, para la aplicación del Intercambio Iónico, según un TC. ....	207
Tabla 11.65: Resumen de los volúmenes medios tratados por localidad, y sus respectivas estimaciones de costos por el cambio anual de la resina, para la aplicación del Intercambio Iónico, según un TD. ....	207
Tabla 11.66: Costos anuales de Operación referentes al consumo de agua para regeneración, según los volúmenes utilizados tanto en un TC, como en el TD. ....	208
Tabla 11.67: Datos técnicos de ablandadores de bajo consumo, utilizados para las estimaciones de costos. ....	209
Tabla 11.68: Proyección de OPEX anuales, asociados al Consumo de Sal para la regeneración de la resina, para ambas alternativas de implementación. ....	209
Tabla 11.69: Resumen de la proyección de OPEX E.C., según un TC. ....	210
Tabla 11.70: Resumen de la proyección de OPEX E.C., según un TD. ....	210
Tabla 11.71: Volúmenes medios tratados por PTAP, y sus respectivas estimaciones de costos por el cambio anual de la resina, para la aplicación del Intercambio Iónico, según un TC. ....	210
Tabla 11.72: Volúmenes medios tratados por localidad, y sus respectivas estimaciones de costos por el cambio anual de la resina, para la aplicación del Intercambio Iónico, según un TD. ....	211
Tabla 11.73: Proyección del consumo anual de sal, para la regeneración de la resina, para ambas alternativas de implementación. ....	211

Tabla 11.74: Proyección anual de cantidades de Clientes Equivalentes Tratados, para ambas alternativas de implementación.....	212
Tabla 11.75: Proyección anual de OPEX por Consumo de Energía eléctrica, para ambas alternativas de implementación.....	212
Tabla 11.76: Proyección anual unificada, de cada tipo de costo de operación según tratamiento por cliente, para un TC. ....	213
Tabla 11.77: Proyección anual unificada, de cada tipo de costo de operación según tratamiento por cliente, para un TD. ....	213
Tabla 11.78: Proyección de volúmenes de agua utilizada para la regeneración de la resina, referente al 15% del agua tratada, para un TC.....	214
Tabla 11.79: Proyección de volúmenes de agua utilizada para la regeneración de la resina, referente al 15% del agua tratada, para un TD.....	215
Tabla 11.80: Resumen de la estimación proyectada de los OPEX O., dada la aplicación de un TC. ....	215
Tabla 11.81: Resumen de la estimación proyectada de los OPEX O., dada la aplicación de un TD. ....	216
Tabla 11.82: Estimación proyectada de los OPEX por Servicios de Operación y mantención, según un TC. ....	216
Tabla 11.83: Estimación proyectada de los OPEX por Servicios de Operación y mantención, dada la aplicación según un TD. ....	216
Tabla 11.84: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Intercambio Iónico para un TC. ....	217
Tabla 11.85: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Intercambio Iónico para un TD.....	217
Tabla 11.86: Promedio de los porcentajes de cada ítem de los CAPEX, para PEAP de gran caudal de diseño, en los sistemas de producción de Aguas del Altiplano.....	218
Tabla 11.87: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Sistema Antical Electrónico como un TC. ....	218
Tabla 11.88: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Sistema Antical Electrónico, como un TD. ....	218
Tabla 11.89: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico para un TC....	219
Tabla 11.90: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico para un TD. ..	219
Tabla 11.91: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Sistema Desincrustante Magnético, como TC.220	
Tabla 11.92: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de S.D.M., como TD. ....	221
Tabla 11.93: Actualización de la valorización de los CAPEX de cada partida del tratamiento Intercambio Iónico, según los porcentajes presentados en el ANEXO T; “CAPEX; Intercambio Iónico”, para un TC. ....	221
Tabla 11.94: Actualización de la valorización de los CAPEX de cada partida del tratamiento Intercambio Iónico, según los porcentajes presentados en el ANEXO T; “CAPEX; Intercambio Iónico”, para un TD. ....	221
Tabla 11.95: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Precipitación con Cal según un TC. ....	222
Tabla 11.96: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Precipitación con Cal según un TD.....	222
Tabla 11.97: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Nanofiltración según un TC. ....	222
Tabla 11.98: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Nanofiltración según un TD.....	222
Tabla 11.99: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Intercambio Iónico según un TC. ....	223

Tabla 11.100: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Intercambio Iónico según un TD.....	223
Tabla 11.101: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico según un TC. .....	223
Tabla 11.102: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico según un TD. .....	223
Tabla 11.103: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Sistema Desincrustante Magnético según un TC. ....	224
Tabla 11.104: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Sistema Desincrustante Magnético según un TD. ....	224
Tabla 11.105: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Precipitación con Cal por una “Empresa Modelo”, según un TC. ....	227
Tabla 11.106: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Precipitación con Cal por una “Empresa Modelo”, según un TD. ....	227
Tabla 11.107: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Nanofiltración por una “Empresa Modelo”, según un TC. ....	227
Tabla 11.108: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Nanofiltración por una “Empresa Modelo”, según un TD. ....	227
Tabla 11.109: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Intercambio Iónico por una “Empresa Modelo”, según un TC. ....	228
Tabla 11.110: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Intercambio Iónico por una “Empresa Modelo”, según un TD. ....	228
Tabla 11.111: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico por una “Empresa Modelo”, según un TC. ....	228
Tabla 11.112: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico por una “Empresa Modelo”, según un TD. ....	228
Tabla 11.113: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Sistema Desincr. Magnético por una “Empresa Modelo”, para un TC.....	229
Tabla 11.114: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Sistema Desincrustante Magnético por una “Empresa Modelo”, para un TD. ....	229
Tabla 11.115: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de P. con Cal por una “Empresa Modelo”, para un TC. ....	229
Tabla 11.116: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de P. con Cal por una “Empresa Modelo”, para un TD. ....	229
Tabla 11.117: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Nanofiltración por una “Empresa Modelo”, para un TC.....	230
Tabla 11.118: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Nanofiltración por una “Empresa Modelo”, para un TD. ....	230
Tabla 11.119: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Int. Iónico por una “Empresa Modelo”, para un TC. ....	230

Tabla 11.120: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Int. Iónico por una “Empresa Modelo”, para un TD. ....	230
Tabla 11.121: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de S.A. Electrónico por una “Empresa Modelo”, para un TC.....	231
Tabla 11.122: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de S. A. Electrónico por una “Empresa Modelo”, para un TD. ....	231
Tabla 11.123: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de S. D. Magnético por una “Empresa Modelo”, para un TC.....	231
Tabla 11.124: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de S. D. Magnético por una “Empresa Modelo”, para un TD. ....	231
Tabla 11.125: Proyección de la facturación anual media, para cada una de las localidades en estudio. ....	232
Tabla 11.126: TIR de cada tratamiento. En rojo las tasas negativas, en naranja las tasas positivas y no rentables, y en verde las rentables.....	234

## GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Evaluación de los clientes de las empresas sanitarias de Chile, según el quinto Aspecto evaluado por la Pregunta 2. Se destacan en bloques separados las empresas del Norte, Centro y Sur, según la clasificación del ANEXO A; “División territorial” .....	9
Gráfico 2.2: Evaluación de los clientes de las empresas sanitarias de Chile, según el séptimo Aspecto evaluado por la Pregunta 2. Se destacan en bloques separados las empresas del Norte, Centro y Sur, según la clasificación del ANEXO A; “División territorial” .....	10
Gráfico 2.3: Comparativa simplificada de la evaluación de los Aspectos 5 y 7 de la Pregunta 2, para cada Macro Región Natural. *Para la simplificación, se realiza una ponderación lineal, según la cantidad de muestras de cada empresa, y de cada Macro Región Natural.....	10
Gráfico 2.4: ISN del servicio de agua potable según el aspecto evaluado, dada la evaluación de los clientes a las empresas sanitarias más importantes del país. ....	11
Gráfico 2.5: ISN del servicio de agua potable, dada la evaluación de los clientes a las empresas sanitarias más importantes del país. ....	12
Gráfico 2.6: ISN (ponderado para cada Macro Región Natural) del servicio de agua potable según el aspecto evaluado, dada la evaluación de los clientes a las empresas sanitarias más importantes del país. ....	12
Gráfico 2.7: ISN del servicio de agua potable según el aspecto evaluado, dada la evaluación de los clientes a las empresas sanitarias más importantes del Norte Grande del país, en conjunto con el promedio nacional. ....	13
Gráfico 2.8: Del tipo barras o columnas, que presenta los promedios de las notas evaluadas por los clientes, a los 3 aspectos considerados relevantes, para cada región en estudio por separado. ....	15
Gráfico 2.9: Del tipo barras o columnas, que presenta los promedios de las notas evaluadas por los clientes, a los 3 aspectos considerados relevantes, para la región de Tarapacá, y también los promedios particulares de cada una de las regiones. ....	16
Gráfico 2.10: Distribución de la dureza del AP en Chile, tanto en promedio como los máximos y mínimos, según estudio M. Neira.....	45
Gráfico 3.1: Distribución de la concentración de dureza y del índice de satisfacción neta ponderado, para cada una de las regiones naturales. Fuente: Elaboración Propia. ....	55
Gráfico 3.2: Distribución de la concentración de dureza y del índice de satisfacción neta; ponderado y de cada uno de los aspectos específicos, para cada una de las regiones naturales. El eje del ISN% se encuentra “girado”. Fuente: Elaboración Propia.....	56
Gráfico 3.3: Concentraciones de dureza total, diferenciando las 4 localidades y sus tipos de puntos de muestreo. ....	59
Gráfico 3.4: Concentraciones de dureza cálcica, diferenciando las 4 localidades y sus tipos de puntos de muestreo. ....	60
Gráfico 3.5: Concentraciones de dureza total, diferenciando solo el tipo de punto de muestreo. ....	60
Gráfico 3.6: Concentraciones de dureza cálcica, diferenciando solo el tipo de punto de muestreo. ....	60
Gráfico 6.1: Caudales proyectados en función de los años, diferenciando los distintos tipos de caudales; de Consumo Medio Anual (_cma), Máximo Diario de Consumo (_mdc) y Máximo Diario de Distribución (_mdd), aplicando los factores (FDMC) y porcentajes de pérdidas de distribución (%D), respectivos. ....	86

Gráfico 6.2: Gráfico circular de los porcentajes de agua a tratar, según el 100% del agua a distribuir para el sistema IQQ-AH, dada la aplicación dispersa de los tratamientos en cada una de las localidades en estudio. ....	91
Gráfico 7.1: Peso porcentual del CAPEX y OPEX, respecto al CTLPN para cada tratamiento y forma de aplicación en estudio. ....	112
Gráfico 7.2: Peso porcentual del CAPEX y OPEX, respecto al CTLPN para cada tratamiento y forma de aplicación en estudio, según una empresa “modelo”. ....	120
Gráfico 8.1: Extracto de los resultados de Dureza, Sólidos Disueltos Totales, y Turbiedad del agua potable (de izquierda a derecha, en función del tiempo), diferenciando con color naranja el agua tratada y en color celeste aquella sin tratar. ....	138
Gráfico 11.1: Índices habitacionales de la localidad de Iquique, calculados con data histórica de la base de datos del INE, en azul. En naranja se muestra la proyección realizada al índice, para los años del horizonte de diseño. ....	164
Gráfico 11.2: Índices habitacionales de la localidad de Alto Hospicio, calculados con data histórica de la base de datos del INE, en azul. En naranja se muestra la proyección realizada al índice, para los años del horizonte de diseño. ...	164
Gráfico 11.3: Distribución de la concentración de dureza, del índice de satisfacción neta; ponderado y solo del precio, para cada una de las regiones naturales. El eje del ISN% se encuentra “girado”. Fuente: Elaboración Propia. ....	166
Gráfico 11.4: Concentraciones de dureza total y cálcica, diferenciando el tipo de punto de muestreo, para la localidad de Iquique.....	172
Gráfico 11.5: Dotaciones de consumo de los años 2015, 2016 y 2017, con su tendencia lineal respectiva, para la localidad de Iquique. Además, se muestran las dotaciones de consumo proyectadas para los próximos 15 años, según la tendencia lineal presentada en la ecuación (11.15). ....	175
Gráfico 11.6: Dotaciones de consumo de los años 2015, 2016 y 2017, con su tendencia lineal respectiva, para la localidad de Alto Hospicio. Además, se muestran las dotaciones de consumo proyectadas para los próximos 15 años, según la tendencia lineal presentada en la ecuación (11.16). ....	176
Gráfico 11.7: Proyección de clientes de Iquique, para los 15 años del horizonte de diseño, calculados según la ecuación (11.19).....	177
Gráfico 11.8: Proyección de clientes de Alto Hospicio, para 15 años del horizonte de diseño, calculados según la ecuación (11.20).....	178
Gráfico 11.9: CAPEX de Obras Civiles de PT físico químico convencional en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.23).....	183
Gráfico 11.10: CAPEX de Tuberías y Accesorios de PT físico químico convencional en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.24).....	184
Gráfico 11.11: CAPEX de Equipos Electromecánicos de PT físico químico convencional en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.25).....	184
Gráfico 11.12: CAPEX de Instalaciones Eléctricas de PT físico químico convencional en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.26).....	184

Gráfico 11.13: Estimación de OPEX por PTAP, en función de la facturación anual, según empresas sanitarias, referentes a la etapa de producción, que poseen PTAP convencionales. Empresas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.27). .....	187
Gráfico 11.14: Costos de Transporte y Disposición de Lodos, de Empresas Sanitarias pertinentes, que poseen PTAP convencionales, en función de la facturación anual. Empresas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.29). .....	198
Gráfico 11.15: CAPEX de Obras Civiles de PT de Osmosis Inversa en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.30). .....	202
Gráfico 11.16: CAPEX de Tuberías y Accesorios de PT de Osmosis Inversa en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.31). .....	203
Gráfico 11.17: CAPEX de Equipos Electromecánicos de PT de Osmosis Inversa en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta modificada según supuestos, se presenta en la ecuación (11.32). .....	203
Gráfico 11.18: CAPEX de Equipos Electromecánicos de PT de Osmosis Inversa en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta modificada según supuestos, se presenta en la ecuación (11.33). .....	203
Gráfico 11.19: OPEX por consumo de energía estimados, referentes a PTAP de Nanofiltración, en función del caudal tratado anualmente. Se realiza una línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.34). .....	204
Gráfico 11.20: OPEX por consumo de agregados químicos estimados, referentes a PTAP de Osmosis Inversa, en función del caudal tratado anualmente. Se realiza una línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación se presenta en la ecuación (11.35). .....	205
Gráfico 11.21: Caudal máximo de capacidad en función del diámetro, para equipos bridados presentes en los catálogos de los equipos S.D.M., en conjunto con la estimación de capacidades mencionada. ....	220

## IMÁGENES

Imagen 2.1: Algunas de las apariencias del mineral de calcita en la naturaleza. Fuente: <a href="https://www.mineralesyrocas.top/calcita/">https://www.mineralesyrocas.top/calcita/</a> .....	27
Imagen 2.2: Fotografía satelital de la posición geográfica de los sectores de producción del sistema de AP de Iquique. Fuente: Google Maps. ....	52
Imagen 4.1: Instalación de referencia del descalcificador Vulcan en una tubería. Fuente: <a href="http://www.cwt-vulcan.es/technology.html">http://www.cwt-vulcan.es/technology.html</a> .....	71
Imagen 8.1: Línea de salida de la bomba de impulsión, de la red de AP del Laboratorio. ....	130
Imagen 8.2: De izquierda a derecha, Lavaplatos del comedor del laboratorio, y lavaplatos del lugar para café de las oficinas. ....	130
Imagen 8.3: A la izquierda el modelo de hervidor utilizado para la prueba piloto, y a la derecha el sistema instalado en la línea de impulsión de agua potable que suministra al laboratorio de calidad de agua potable. ....	131
Imagen 8.4: Sistema AIV instalado en la sala de bombas, inmediatamente aguas arriba del sistema de bombeo. ....	132
Imagen 8.5: Lugares de instalación de los hervidores, tanto en el comedor del laboratorio (izquierda), como en el sector para café de las oficinas (derecha). En ambas imágenes se diferencian los hervidores de uso controlado con marcas rojas. ....	132
Imagen 8.6: Fotos de los estados del hervidor controlado de la zona para café, al finalizar las semanas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 (de izquierda a derecha, de arriba abajo). ....	134
Imagen 8.7: Fotos de los estados del hervidor controlado de la zona para café, al finalizar las semanas 7, 8, 9, 10, 11 y 12 (de izquierda a derecha, de arriba abajo). ....	134
Imagen 8.8: Fotos de los estados del hervidor controlado de la zona para café, al finalizar las semanas 13, 14 y 15 (de izquierda a derecha, de arriba abajo). ....	135
Imagen 8.9: Fotos de los estados del hervidor controlado zona del comedor del laboratorio, al finalizar las semanas 1, 2, 3, 5 y 6 (de izquierda a derecha, de arriba abajo). ....	135
Imagen 8.10: Fotos de los estados del hervidor controlado zona del comedor del laboratorio, al finalizar las semanas 7, 8 y 9 (de izquierda a derecha, de arriba abajo). ....	136
Imagen 8.11: Fotos de los estados del hervidor controlado zona del comedor del laboratorio, al finalizar las semanas 10, 12, 13, 14 y 15 (de izquierda a derecha, de arriba abajo). ....	136
Imagen 8.12: Condición final de los hervidores controlados de la línea con tratamiento a la izquierda, y sin tratamiento a derecha. ....	136
Imagen 8.13: Residuos en el fondo del hervidor controlado (agua tratada), luego de 4 semanas de uso. ....	137
Imagen 8.14: Condición final del vaso precipitado y los depósitos decantados, transcurridos 56 [min] en reposo. ...	137
Imagen 8.15: Condición inicial de la salida de la grifería del lavaplatos, de la zona para café de las oficinas, y del comedor del laboratorio, de izquierda a derecha respectivamente. ....	138
Imagen 11.1: Fotografía satelital de la posición geográfica de sectores de producción del sistema AP Arica. Fuente: Google Maps. ....	155

Imagen 11.2: Fotografía satelital de la posición geográfica de sectores de producción del sistema AP Iquique. Fuente: Google Maps. .... 159

Imagen 11.3: Línea de agua potable, en donde se encuentra la llave de paso para alimentación del sector de oficinas. .... 234

# 1 INTRODUCCIÓN

---

El agua es el compuesto fundamental para el desarrollo de lo que conocemos como vida en nuestro planeta y, por si fuera poco, su ingesta en estado líquido es la base para la supervivencia del ser humano, siendo más importante incluso que los alimentos. De hecho, el humano solo puede permanecer con vida entre tres a cinco días sin tomar agua<sup>1</sup>, al necesitar de ella para los procesos más complejos del organismo, y en cambio, puede llegar a resistir más de un mes sin ingerir algún tipo de alimento<sup>2</sup>.

El agua, además de ser vital, es el compuesto cuantitativamente más importante para el ser humano<sup>3</sup>, representando en promedio un 60% de su peso corporal [3] (con un rango de  $\pm 15\%$ <sup>4</sup>), y formando parte de un ciclo dentro del organismo, en donde gran cantidad es expulsada a través de la orina, el sudor e incluso al respirar (en estado gaseoso).

Sin embargo, el agua disponible en la naturaleza no está compuesta solamente por la molécula de agua H<sub>2</sub>O, si no que resulta ser una mezcla de sales en solución, tal como lo explica el Doctor en Ciencias de la Química, Eduardo López Maldonado;

*Dada la capacidad del agua para disolver casi cualquier sustancia, el agua químicamente pura – sin ninguna sustancia disuelta – no existe en la naturaleza. Es frecuente que el agua adquiera sustancias que resultan indeseables para un uso determinado y, por ello, se puede decir que se contamina fácilmente. [4]*

Así, durante su ciclo geológico, el agua líquida incorpora distintos elementos, compuestos y minerales a su paso al ser un disolvente universal<sup>5</sup>, presentándose en sus fuentes con distintas concentraciones, sea en el mar, lagos, ríos, napas subterráneas, entre otras, y cuyos niveles dependerán principalmente de características geográficas.

Dada la variabilidad de sustancias presentes en el agua (disponible en la naturaleza), es que existen diversas normativas de calidad de agua potable, que deben cumplir las empresas u organismos sanitarios responsables de su distribución alrededor del mundo, para así entregar a los usuarios un agua con las características que la hacen potable según la normativa respectiva. En el

---

<sup>1</sup> A temperatura normal, y con una baja cantidad de ejercicio físico, tal y como lo mencionan las guías de supervivencia.[1]

<sup>2</sup> Cabe mencionar que, como señala el Dr. Alan Lieberson (doctor en derecho, abogado y autor de “Tratamiento del dolor y el sufrimiento en las directivas médicas de enfermedades terminales y avanzadas”) en la revista Scientific American el año 2005, “la duración de la supervivencia sin alimentos está fuertemente influenciada por factores tales como el peso corporal, la variación genética, otras consideraciones de salud y, sobre todo, la presencia o ausencia de deshidratación”.

<sup>3</sup> El 75% del cerebro, el 79% del corazón, el 83% de la sangre, el 79% de los pulmones y el 22% de los huesos son agua [2] (mencionando los más importantes).

<sup>4</sup> Dicho rango se debe a que el porcentaje de agua del peso corporal depende del género y de la edad de la persona.

<sup>5</sup> En estado líquido, es el que más compuestos disuelve, con dificultades en presencia de moléculas apolares [5].

caso particular de Chile, la norma que fija los requisitos que debe cumplir el agua para su correcta distribución, es la NCh409/1.Of2005, en la que se define al AP como:

*Agua que cumple con los requisitos microbiológicos, de turbiedad, químicos, radiactivos, organolépticos y de desinfección descritos en NCh409/1, que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano.*

Por esto, las empresas sanitarias de Chile deben realizar distintos tipos de tratamientos para alcanzar los estándares normados, los que son diversos en calidad y cantidad, ya que la distribución del recurso hídrico no es equitativa, tanto en volumen como en calidad del agua de las fuentes de extracción, debido a las características heterogéneas de la geografía de norte a sur.

En el norte de Chile, la mayoría de las fuentes naturales para producción de agua potable corresponden a sondajes que captan aguas profundas y altamente mineralizadas<sup>6</sup>. La presencia de distintas sales minerales en estas fuentes hace que su potabilización requiera de variados tipos de tratamientos, sin embargo, en la mayoría de los casos, dichos procesos no reducen algunos minerales abundantes del agua nortina. Tal es el caso de aquellos que generan los niveles de dureza más altos del país ya que, al ser inofensiva para la salud, no se encuentra normada en Chile.

La dureza del agua es un indicador asociado a la presencia de compuestos minerales y se determina, en Chile, a partir de la concentración de sales de magnesio y calcio [6]. El agua denominada “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en pocas cantidades. Las aguas duras generan efectos visuales asociados a su uso, como lo son residuos, manchas e incrustaciones en artefactos sanitarios y electrodomésticos, afectando directamente la percepción de calidad del agua potable por parte de los usuarios.

De hecho, dentro de los reclamos más frecuentes que se presentan por la calidad del agua potable ante la SISS, se encuentran los referidos a la dureza del agua, ya que los artefactos, hervidores y teteras tienden a acumular en sus superficies depósitos calcáreos, más conocido como “sarro” [7].

Es así como existen diferencias en la calidad percibida por el usuario del agua potable a lo largo del país. Por un lado, los del sur se enorgullecen por sus aguas de gran calidad, sabor y disponibilidad, los del norte exigen niveles de calidad acorde a los esperados en estos tiempos, ya que sus aguas, cumpliendo la normativa de calidad, poseen sabor seco (percibido), a veces escasea y provoca los daños asociados a su uso, debido a sus altas concentraciones de dureza<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> Debido a las características geográficas del norte de Chile, la escasez de aguas superficiales hace que la extracción sea, mayoritariamente, mediante sondajes que captan las napas subterráneas que fluyen desde la Cordillera de los Andes al océano Pacífico.

<sup>7</sup> Así lo indica el Informe Final del Sector Sanitario, realizado por la SISS en el año 2016, particularmente en la ilustración “RANKING DE EMPRESAS SEGÚN ISN DEL SERVICIO DE AGUA POTABLE”, el que refleja una condición cuasi lineal de percepción de norte a sur, donde las mejores evaluadas se encuentran en el sur de Chile, y las peores en el norte.

Por su parte, la industria sanitaria en Chile, durante los últimos años, ha enfocado su gestión en la satisfacción de sus clientes, incluso mediante la prestación de servicios en niveles superiores a los normados, con el fin de abarcar las exigencias de una sociedad más globalizada, informada y consciente.

## **1.1 OBJETIVOS GENERALES**

Entendiendo la importancia de la dureza presente en el agua potable de Chile, el objetivo principal del presente trabajo de título es analizar la conveniencia de mitigar los efectos de la dureza en el sistema de agua potable suministrada a las ciudades nortinas de Iquique y Alto Hospicio, y el impacto que esto podría generar en la percepción y en la tarifa de los usuarios de estos sistemas.

Así, la mitigación de los efectos de la dureza se podrá lograr mediante 3 formas;

- 1) Eliminándola, con tratamientos de agua potable capaces de hacerlo.
- 2) Disminuyéndola, amortiguando las concentraciones de sales de magnesio y calcio para alcanzar una concentración de dureza objetivo.
- 3) Mitigar y/o eliminar sus efectos, directamente y sin cambiar la concentración de la dureza del agua, mediante tratamientos no convencionales capaces de lograrlo.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1) Evaluar técnicamente y caracterizar las alternativas de tratamiento de técnicas abatidoras de dureza, o mitigantes de sus efectos.
- 2) Analizar a nivel de factibilidad las condiciones y costos de habilitación de las distintas opciones para el sistema de producción de Iquique – Alto Hospicio.
- 3) Calcular el impacto tarifario de cada una de las opciones, si su implementación fuera financiada por esta vía.
- 4) Seleccionar un proceso de tratamiento para mejorar la percepción de los clientes respecto del agua potable suministrada y, de ser factible, verificar su eficacia mediante la ejecución de una prueba piloto.

## **1.3 ALCANCES**

Debido a la fuerte relación entre el lugar geográfico dentro de Chile y su percepción de calidad del agua potable, el siguiente trabajo de título se centra en el impacto en la opinión de los clientes con respecto a una mejora, no exigida por normativa, respecto al abatimiento de los efectos de la dureza, solo en la zona norte del país, específicamente en el sistema aislado (para el estudio), de las localidades de Iquique y Alto Hospicio.

Aun cuando el estudio se centra en estas dos localidades, puede servir de guía para la implementación de tratamientos abatidores de los efectos de la dureza en el agua potable de otras regiones del país, siempre y cuando se tomen las consideraciones respectivas y particulares de cada caso. Cabe mencionar que mientras la concentración de dureza, de la localidad o zona a estudiar,

se acerque a la del sistema Iquique y Alto Hospicio, los resultados y conclusiones presentados en el estudio serán de mayor utilidad, aproximándose preliminarmente de mejor manera.

Además, este estudio tiene un carácter general, basado en criterios de diseño de procesos de Ingeniería Conceptual, y áreas de la Ingeniería de Detalle en algunos casos puntuales. Por esta razón, no se deben considerar los montos y cálculos realizados para la implementación real de algún tipo de tratamiento abatidor de dureza en algún proceso de producción y/o distribución sanitaria, pero si resulta ser una guía para los procesos primarios de estos proyectos, como evaluaciones y análisis previos.

Finalmente cabe señalar que todos los supuestos y consideraciones realizados se presentan particularmente en cada uno de los apartados y secciones del estudio.

## 2 ANTECEDENTES GENERALES

---

### 2.1 SOBRE LA CALIDAD DE SERVICIO DE AGUA POTABLE

Los efectos del uso del agua potable se relacionan directamente con el nivel de satisfacción de los usuarios hacia el servicio sanitario que se les entrega. Así, la percepción de calidad del agua se puede ver afectada por malas experiencias puntuales, esporádicas o constantes, así como también por condiciones propias de las aguas disponibles, entre otras razones.

Dado que la percepción de la calidad del agua potable cobra gran importancia en cuanto a la aceptación del servicio sanitario<sup>8</sup>, por parte de los usuarios, cualquier forma que suponga una mejora en la calidad del producto final, es de interés para la industria sanitaria. Una de las formas (la más lógica) es superar los estándares mínimos planteados por la normativa, para lograr una mejora en la calidad final del agua potable.

Bajo este contexto, desde hace unos años, la industria sanitaria ha enfocado su gestión en la satisfacción de sus clientes, incluso mediante la prestación de servicios a niveles superiores a los normados, entendiendo la importancia de este servicio para el desarrollo de los países y las sociedades, y cómo características, como las organolépticas, cada vez cobran mayor importancia para el usuario final, en cuanto a su percepción.

Si bien la NCh409/1.Of2005 contempla aspectos referidos a las cualidades organolépticas, como el sabor (exige que sea insípida), olor (exige que sea inodora), y visión, al controlar la transparencia del agua mediante la turbiedad y el color verdadero [8], esta no se refiere a los efectos provocados por el uso del agua, como es el caso de las incrustaciones generadas por aguas duras, y que tienen un alto impacto en la percepción de calidad por parte de los usuarios. Además, existen factores externos que afectan la percepción de las personas, como lo son las críticas de la opinión pública.

Cabe mencionar que, el agua potable contiene elementos o sustancia químicas que son de importancia para la salud, como los mostrados en la “Tabla 1 – Elementos esenciales” de la NCh409/1.Of2005 [8], siendo el Cobre, Cromo, Fluoruro, Hierro, Manganeso, Magnesio, Selenio y Zinc, que poseen distintas concentraciones máximas permisibles expresadas en [mg/l]. En cuanto a los mínimos de concentración de dichos elementos, la normativa no menciona ninguno.<sup>9</sup>

Tal es la necesidad de los minerales presentes en el agua, que las empresas que producen agua mineral (muchas veces embotellada), le agregan, mantienen o modifican elementos para controlar el sabor o “textura al paladar” del producto. Así se presenta en la Memoria [10] de Giuseppe Bonatici, en donde incluso algunas de las empresas de aguas minerales, sobrepasan los límites de

---

<sup>8</sup> Referente a las cuatro etapas del proceso sanitario; Producción, Distribución, Recolección y Disposición.

<sup>9</sup> Sin embargo, estudios [9] demuestran los beneficios del consumo diario de dichos elementos en dosis menores, iguales o incluso mayores (dependiendo del rango etario, el elemento y la cantidad de agua ingerida) a las planteadas por la normativa chilena.

concentración de algunos elementos normados para las aguas potables distribuidas, tal y como se presenta en la *Tabla 2.2*. Cabe mencionar, que la normativa que fija las concentraciones límite de las aguas minerales, es el Decreto 106 [11], sin embargo, en la *Tabla 2.1* de igual forma se adjuntan los límites de la norma de calidad de agua potable NCh409/1.Of2005, a modo de comparación.

Tabla 2.1: Límites de elementos y parámetros según normativas de calidad para aguas potables y minerales de Chile.

Límite	Arsénico [mg/l]	Nitrato [mg/l]	pH	Dureza Total [ml/l de CaCO <sub>3</sub> ]
NCh409	0,01	50	6,5 < pH < 8,5	-
Decreto 106	0,05	45	-	-

Tabla 2.2: Extracto de los resultados de la memoria “El Agua que bebemos” de Giuseppe Bonatici [10], de cada una de las 10 muestras de agua mineral, de distintas marcas. Se destacan concentraciones que sobrepasen límites normados por la NCh409.

Muestra	Arsénico [mg/l]	Nitrato [mg/l]	pH	Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]
Andes Mountain	<0,00006	0,25	7,4	11,0
Cachantun	0,00246	44,26	7,7	335,7
Jahuel	<b>0,01254</b>	8,57	8,3	285,5
Jumbo	<b>0,01276</b>	8,10	7,3	277,7
Porvenir	0,0003	5,93	7,5	151,8
Puyehue	<b>0,01897</b>	0,39	7,4	11,3
Tottus	0,00709	0,34	<b>9,3</b>	3,5
Vital	0,00618	2,50	8,1	62,8
Benedictino	0,00104	2,05	8,1	0,6
Nestlé	0,00013	2,21	<b>5,7</b>	88,2

En el caso de la dureza, aguas con concentraciones de 25-50 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] son descritas como sin sabor, y bajo estas son catalogadas con propiedades organolépticas negativas [12]. Por otro lado, según las clasificaciones más importantes de dureza a nivel internacional<sup>10</sup>, las aguas con concentraciones superiores a 180 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] corresponden a “Muy duras”, aun cuando algunos consumidores toleran una dureza del agua a 500 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] [16]<sup>11</sup>.

Así, en la *Tabla 2.2*, se observa que 3 de las 10 muestras realizadas superan los 180 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] (valor catalogado internacionalmente como extremo superior<sup>12</sup>), y 4 de ellas serían catalogadas con propiedades organolépticas negativas (concentraciones menores a 25 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], demostrando así que no hay un estándar, definido y claro, para determinar un “agua bebestible de excelencia”.

Todo lo anterior lo explica la Organización Mundial de la Salud, en su publicación del año 2011, “Dureza en el Agua bebestible” [13], señalando que;

<sup>10</sup> Clasificaciones de la OMS [13], USGS [14] y WQA [15].

<sup>11</sup> Aun cuando el agua con una dureza mayor a aproximadamente 200 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], en función de la interacción de otros factores, como el pH y la alcalinidad, puede provocar la formación de incrustaciones en las instalaciones de tratamiento, el sistema de distribución, y las tuberías y depósitos de los edificios.

<sup>12</sup> Más adelante se detalla una clasificación más acorde a los altos niveles de dureza del país.

*Los minerales disueltos contribuyen al sabor del agua potable en diversos grados, donde la aceptabilidad del agua dependerá generalmente del gusto del usuario individual y familiaridad. El agua desmineralizada tiende a tener un sabor plano, y sus productores a menudo agregan algunos minerales para el sabor. Es así como algunas aguas embotelladas tienen concentraciones minerales excepcionalmente altas y son atractivas para algunos consumidores, pero no serían aceptables para la mayoría de los suministros públicos de agua potable.*

En Chile, el agua para producción y posterior distribución potable, es obtenida tanto de fuentes subterráneas como de superficiales. Dada la heterogeneidad geográfica del país<sup>13</sup>, en el norte el agua disponible proviene en su mayoría de fuentes subterráneas mediante sondajes, y en el sur de captaciones y canalizaciones de fuentes superficiales. Cabe mencionar que en la zona centro se utilizan ambas fuentes para la producción de agua potable, y que además existe una planta desaladora de agua de mar en Antofagasta y un proyecto para la ciudad de Arica<sup>14</sup>.

Entonces, y dada la alta variabilidad de las fuentes de agua en el país, se obtienen distintas concentraciones de minerales a lo largo de las regiones, donde en el norte son altas, por lo que se debe tratar el agua de diversas formas previa a su potabilización, y en el sur, la calidad de sus aguas superficiales sugiere tratamientos más simples, principalmente para eliminar turbiedad, y agregar el cloro [8] y el flúor [18], cumpliendo así la normativa de calidad vigente.

Así, se alcanzan distintas percepciones de calidad a lo largo del país, aun cuando todas las empresas sanitarias cumplan la normativa de calidad, las distintas fuentes de agua para producción, marcarán la evaluación de los usuarios, hacia la integridad del servicio sanitario recibido.

Si bien, la mayoría de los usuarios no disponen de medios para juzgar por sí mismos la seguridad del agua, su actitud hacia el agua de consumo y hacia sus proveedores de agua se verá afectada en gran medida por los aspectos de la calidad del agua que son capaces de percibir con sus propios sentidos. Así, es natural que los consumidores recelen del agua que parezca sucia o tenga un color anormal, o que tenga un olor o sabor desagradable, aunque estas características puedan no tener, en sí mismas, ninguna consecuencia directa para la salud [16].

Últimamente, para la industria sanitaria del país, es de suma importancia la percepción de los usuarios, entendiéndose que existe mayor exigencia a las empresas, dado el avance del desarrollo en el país, el nivel adquisitivo, el acceso libre a la información, la globalización, entre otros, por lo que constantemente está en búsqueda de soluciones que reviertan calificaciones negativas a los servicios que presta, sobretudo el más directo para el usuario, la distribución de agua potable. Para el caso del Norte<sup>15</sup> de Chile, existe una relación directa entre una mala percepción de calidad del

---

<sup>13</sup> La cual marca problemas de disponibilidad y escases de agua en la zona norte (clima seco), y sobre oferta de agua en la zona sur (clima lluvioso) [17].

<sup>14</sup> Ambas utilizan el tratamiento de osmosis inversa, el que se explica más adelante.

<sup>15</sup> Durante el desarrollo del presente trabajo de título, el Norte de Chile se refiere a las Regiones Naturales del Norte grande y Norte Chico, las que se explican de manera detallada en el ANEXO A; “División territorial”.

servicio del agua potable por parte de los usuarios, y la concentración de minerales, particularmente los causantes de dureza, de las aguas de sus fuentes<sup>16</sup>. Dicha relación se fundamenta a continuación, mediante encuestas, informes de gestión y catastros de calidad.

### 2.1.1 Encuesta de Percepción de clientes, SISS [19]

Por noveno año consecutivo<sup>17</sup>, entre el 1 y 31 de marzo de 2017 se realiza un estudio, a lo largo del país, sobre el nivel de satisfacción que presentaban los clientes con el servicio ofrecido por las principales empresas urbanas prestadoras de servicios sanitarios durante 2016, llamada “Encuesta de percepción de clientes de la calidad de servicio de las empresas sanitarias 2016”, realizada anualmente por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). En dicho estudio, se contemplan diversos atributos, tales como:

- El procedimiento empleado en caso de cortes programados de AP.
- La atención telefónica.
- Los lugares de pago.
- La boleta.
- La atención en terreno (en el domicilio).
- Los trabajos que realiza la empresa en la vía pública.
- El servicio de AP.
- La atención brindada en oficinas comerciales.
- El servicio de AS.
- La lectura y medición del consumo de agua en los hogares.

Lo que compete al presente trabajo de título<sup>18</sup>, hace relación a la percepción de los clientes con respecto al servicio de agua potable, y particularmente con la calidad del agua, por lo que una de las preguntas importantes es la 2 (se **destacan** los aspectos más relacionados a la dureza), que dice:

*Pregunta 2: Hablemos del servicio de agua potable que usted recibe en su hogar, quiero pedirle que le ponga nota<sup>19</sup> al servicio de agua potable que usted recibe en su hogar en relación a los siguientes aspectos específicos:*

1. Sabor del agua.
2. Olor del agua.
3. Transparencia / claridad del agua.
4. No afecta a la salud (no contenga elementos dañinos para la salud)
5. **No produzca sarro, no contenga arena.**
6. Presión en general durante el año (fuerza con que sale el chorro).
7. **La confianza que le da el agua que se bebe en la zona.**
8. La continuidad del suministro de agua potable.
9. El precio.

---

<sup>16</sup> Al 31/12/2017, ninguna sanitaria chilena trata el AP que distribuye, para mitigar los efectos de la dureza.

<sup>17</sup> Para la décima versión de la encuesta de percepción, la SISS realizó una revisión metodológica completa, tanto en lo relativo al muestreo como al cuestionario aplicado, mejorando sustantivamente la representatividad de los resultados. Considerando este cambio metodológico, la encuesta fue aplicada a mediados del 2018 y sus resultados se encuentran en etapa de análisis a la fecha de edición de este estudio.

<sup>18</sup> Analizando los informes de cada empresa y las bases de datos, publicadas por la SISS en su página web [20].

<sup>19</sup> El cuestionario contempla notas de números enteros entre 1 y 7 (ver ANEXO B; “Escala de evaluación”), cada vez que se le solicita al encuestado evaluar algún aspecto.

Con los resultados de la *Pregunta 2*, y centrando el análisis en la evaluación a nivel nacional del *Aspecto 5*, referido a la producción de sarro, se genera el *Gráfico 2.1* que muestra el malestar, con respecto a este aspecto, de los clientes de las empresas del Norte de Chile, la amplia variabilidad de los clientes del Centro y la alta aprobación en el Sur del país.

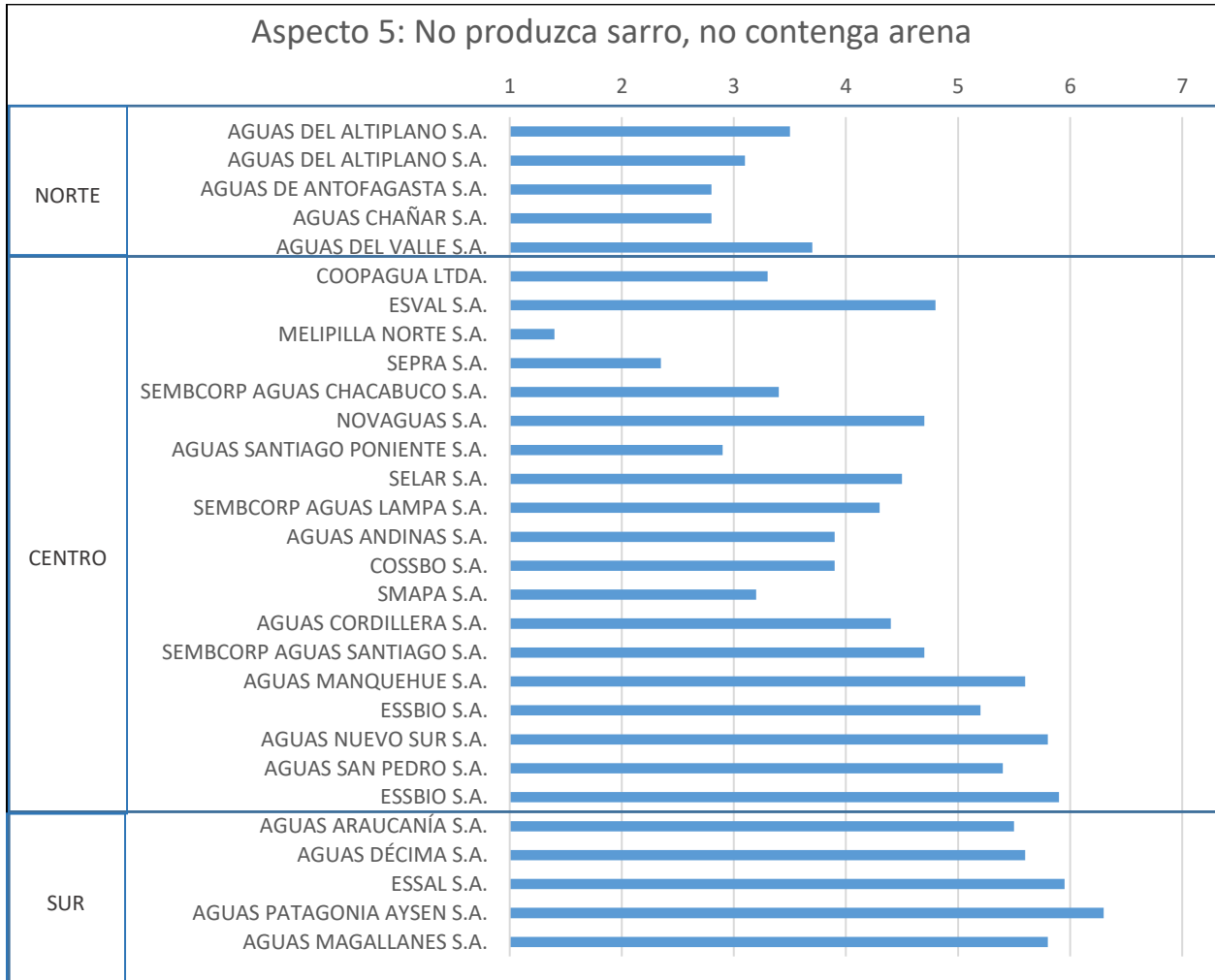


Gráfico 2.1: Evaluación de los clientes de las empresas sanitarias de Chile, según el quinto Aspecto evaluado por la Pregunta 2. Se destacan en bloques separados las empresas del Norte, Centro y Sur, según la clasificación del ANEXO A; “División territorial”.

Además, la evaluación recibida al *Aspecto 7*, el cual se refiere a la confianza que le da el agua que se bebe en la zona, muestra un comportamiento similar al del *Aspecto 5*, tal y como lo muestra el *Gráfico 2.2*, y una comparativa más simplificada en el *Gráfico 2.3*.

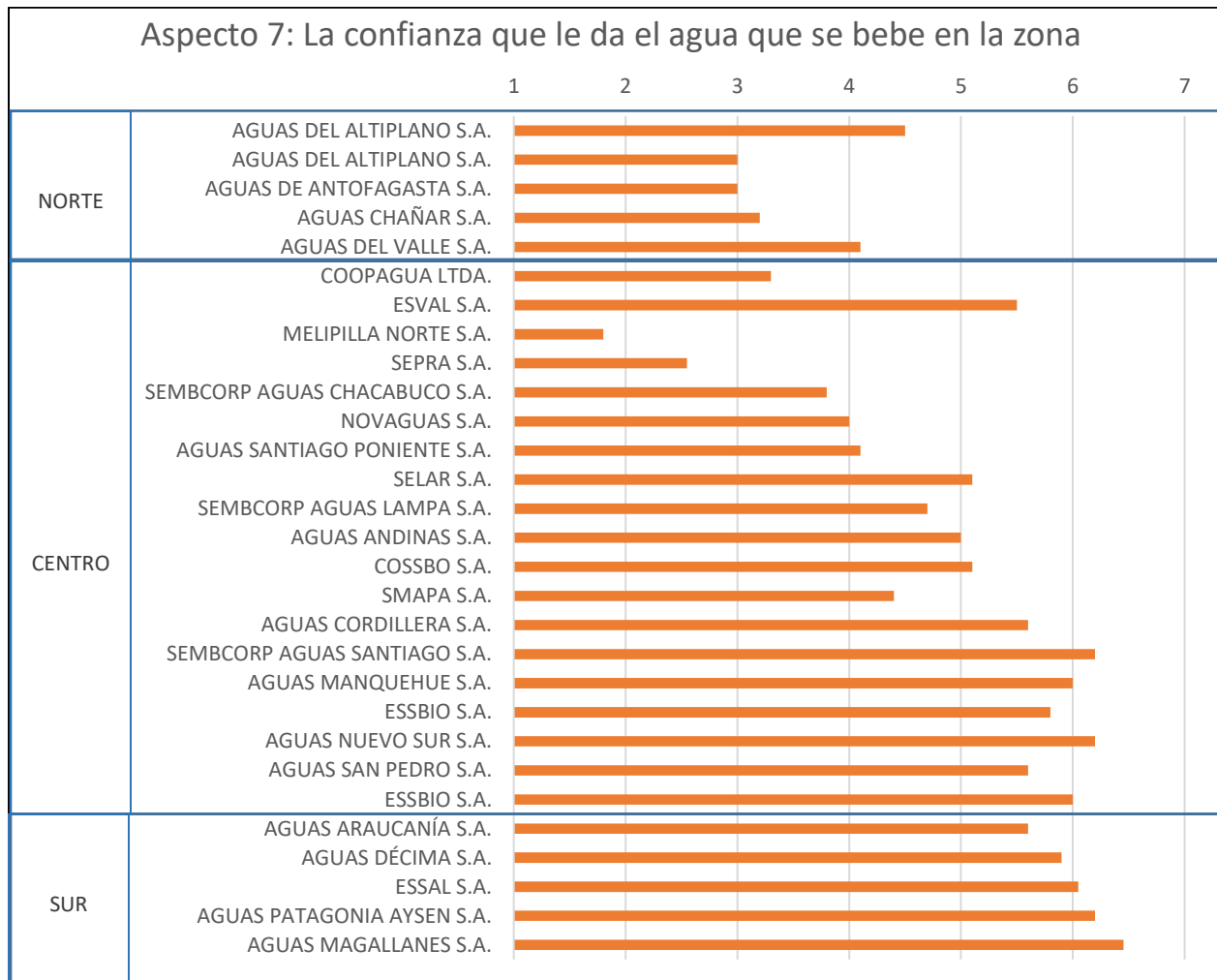


Gráfico 2.2: Evaluación de los clientes de las empresas sanitarias de Chile, según el séptimo Aspecto evaluado por la Pregunta 2. Se destacan en bloques separados las empresas del Norte, Centro y Sur, según la clasificación del ANEXO A; “División territorial”.

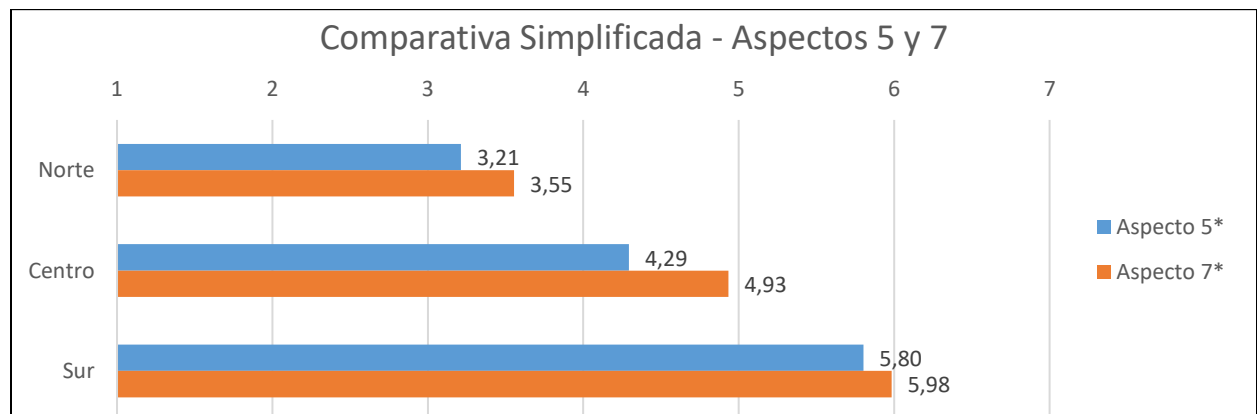


Gráfico 2.3: Comparativa simplificada de la evaluación de los Aspectos 5 y 7 de la Pregunta 2, para cada Macro Región Natural<sup>20</sup>. \*Para la simplificación, se realiza una ponderación lineal, según la cantidad de muestras de cada empresa, y de cada Macro Región Natural.

<sup>20</sup> Según la clasificación planteada en el ANEXO A; “División territorial”.

Además, la insatisfacción del cliente, a lo largo del país, con respecto al *Aspecto 5* (sarro y contenido de arena), se ve reflejada en el *Gráfico 2.4*, que muestra el Índice de Satisfacción Neta (ISN<sup>21</sup>) del servicio de agua potable según cada uno de los aspectos evaluados.

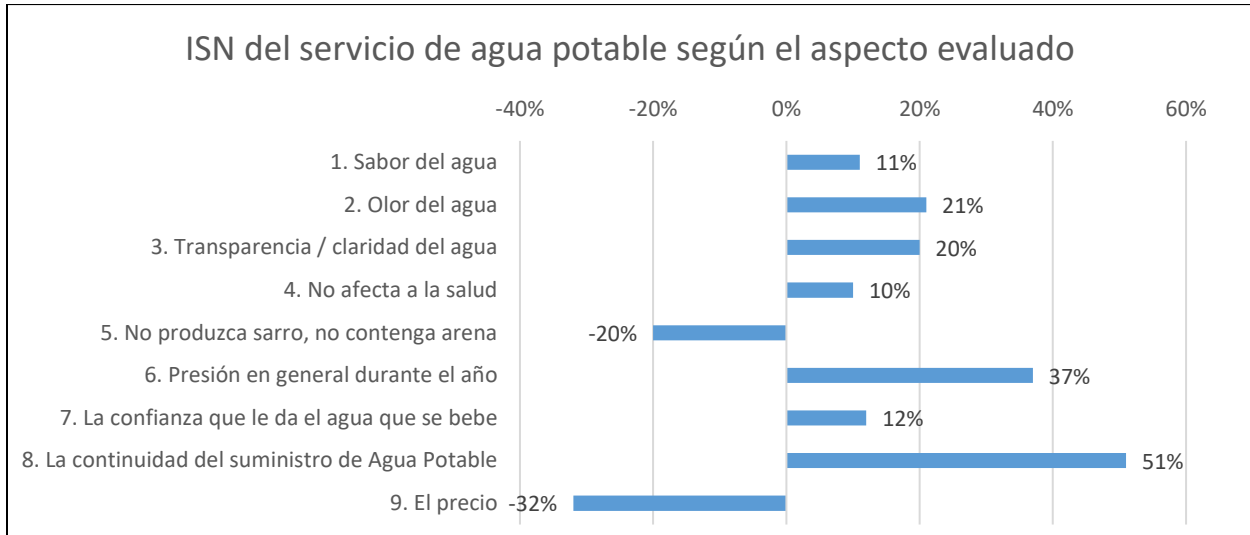


Gráfico 2.4: ISN del servicio de agua potable según el aspecto evaluado, dada la evaluación de los clientes a las empresas sanitarias más importantes del país.

Si bien el *Gráfico 2.4* muestra la mayor insatisfacción con el *Aspecto 9* referente al precio, se entiende que en este tipo de encuestas siempre será el peor evaluado, además de su carácter inherente al servicio sanitario. Por eso, con mayor razón se entiende la importancia del sarro en la percepción de los clientes, dado que es el segundo aspecto con peor ISN, después del precio.

Por otra parte, se analiza la nota global al servicio sanitario, dado el servicio de agua potable, mediante la *Pregunta 4*:

*Pregunta 4: Considerando todas las características del servicio sanitario de agua potable que le hemos hablado ¿Qué nota global le pondría al servicio del agua potable que le proporciona la empresa sanitaria?*

Así, en el informe final de la encuesta [19], se presenta el ISN con respecto al servicio sanitario, tal y como lo muestra en el *Gráfico 2.5*, y de manera simplificada (ponderada), en el *Gráfico 2.6*.

<sup>21</sup> Su forma de cálculo se muestra en el ANEXO C; “Cálculo ISN”.

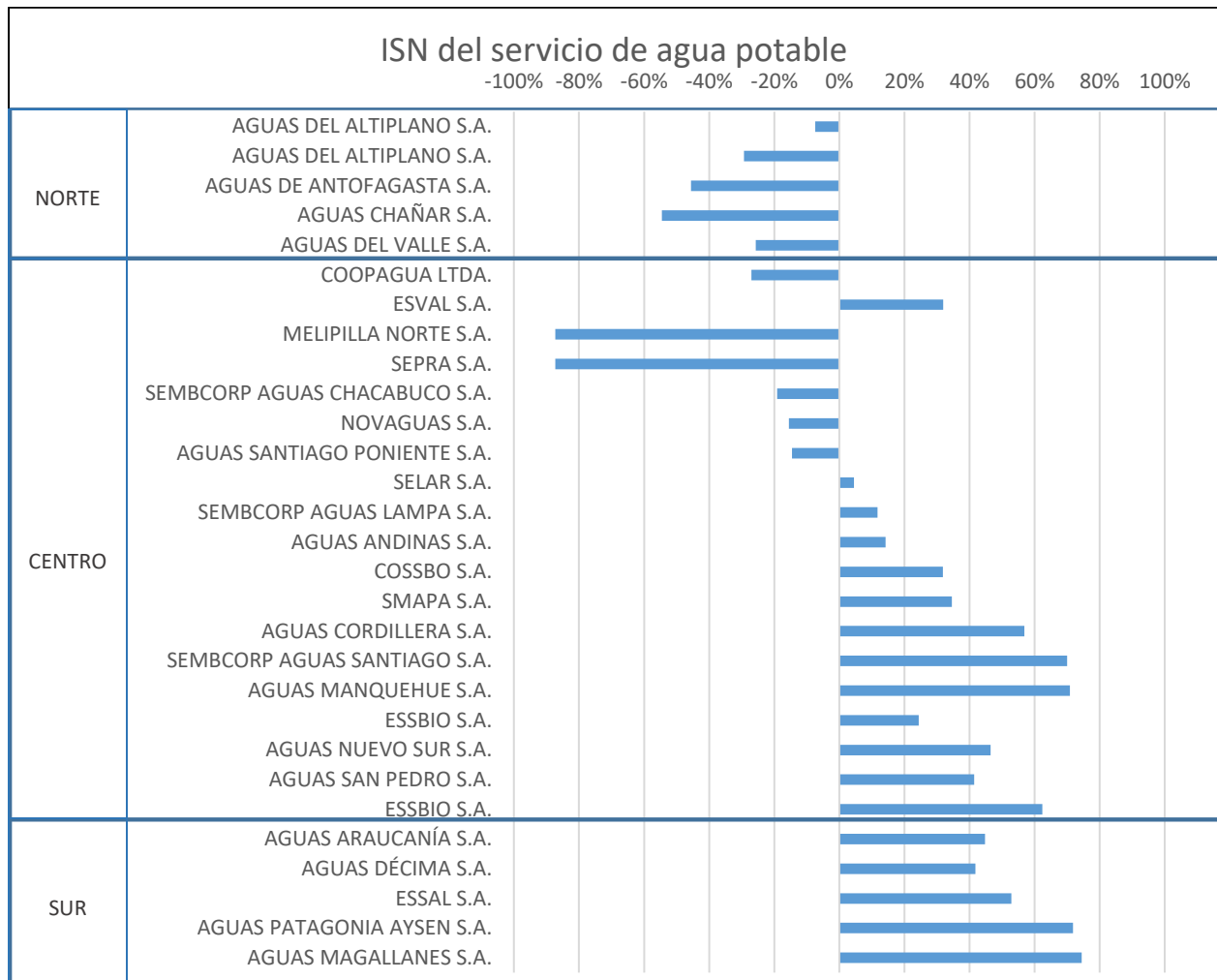


Gráfico 2.5: ISN del servicio de agua potable, dada la evaluación de los clientes a las empresas sanitarias más importantes del país.

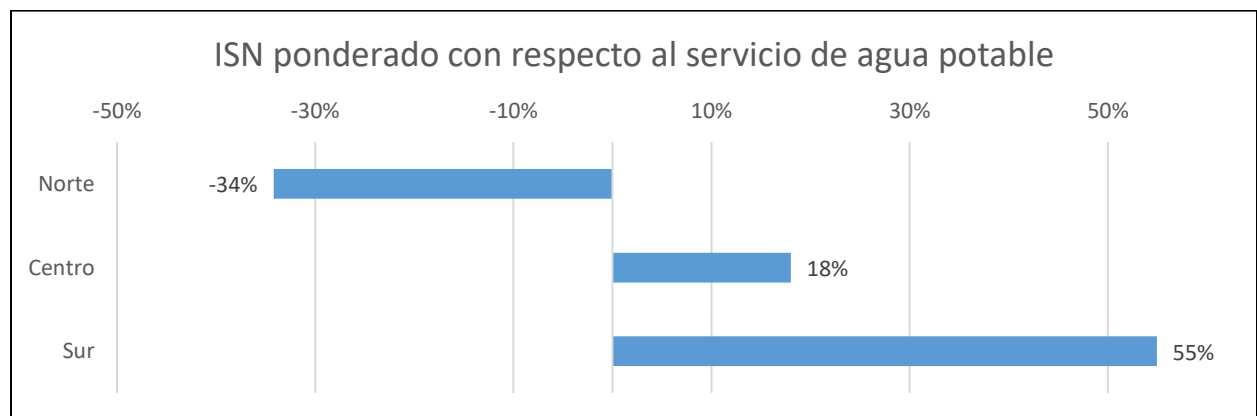


Gráfico 2.6: ISN (ponderado para cada Macro Región Natural) del servicio de agua potable según el aspecto evaluado, dada la evaluación de los clientes a las empresas sanitarias más importantes del país.

Al comparar el *Gráfico 2.3* y el *Gráfico 2.6*, se demuestra la relación directamente proporcional entre la satisfacción con respecto a la calidad del agua (en particular a la presencia de sarro, arena, y la confianza al agua bebestible) y la satisfacción referente al servicio sanitario. Así,

en el Norte de Chile, con las peores evaluaciones de calidad de agua, se obtiene el menor índice de satisfacción neta, ocurriendo lo opuesto en el Sur de Chile con la mejor evaluación y satisfacción.

La desaprobación en el Norte, mostrada por la *Gráfico 2.6*, se debe posiblemente en primer lugar al precio, y en segundo lugar a la generación de sarro y aparición de arena en el agua potable, según lo mostrado por el *Gráfico 2.4* (bajo el supuesto que al menos se sigue la misma tendencia en el norte, con respecto a todo el país).

Ahora bien, centrando el análisis en lo ocurrido con las empresas sanitarias del Norte Grande, y en particular a la empresa Aguas del Altiplano S.A., responsable de la prestación de servicios tanto en la Región de Arica y Parinacota (XV), como en la de Tarapacá (I), se muestra en el *Gráfico 2.7*, la evaluación de cada uno de los 9 Aspectos mencionados por la *Pregunta 2*, en ambas regiones, y el promedio nacional (mostrado también por el *Gráfico 2.4*). Cabe mencionar que el ISN del servicio de agua potable resultó ser de -7% y -29%, para la XV y I Región, respectivamente, y de un 16% a nivel nacional [21] [22] [19].

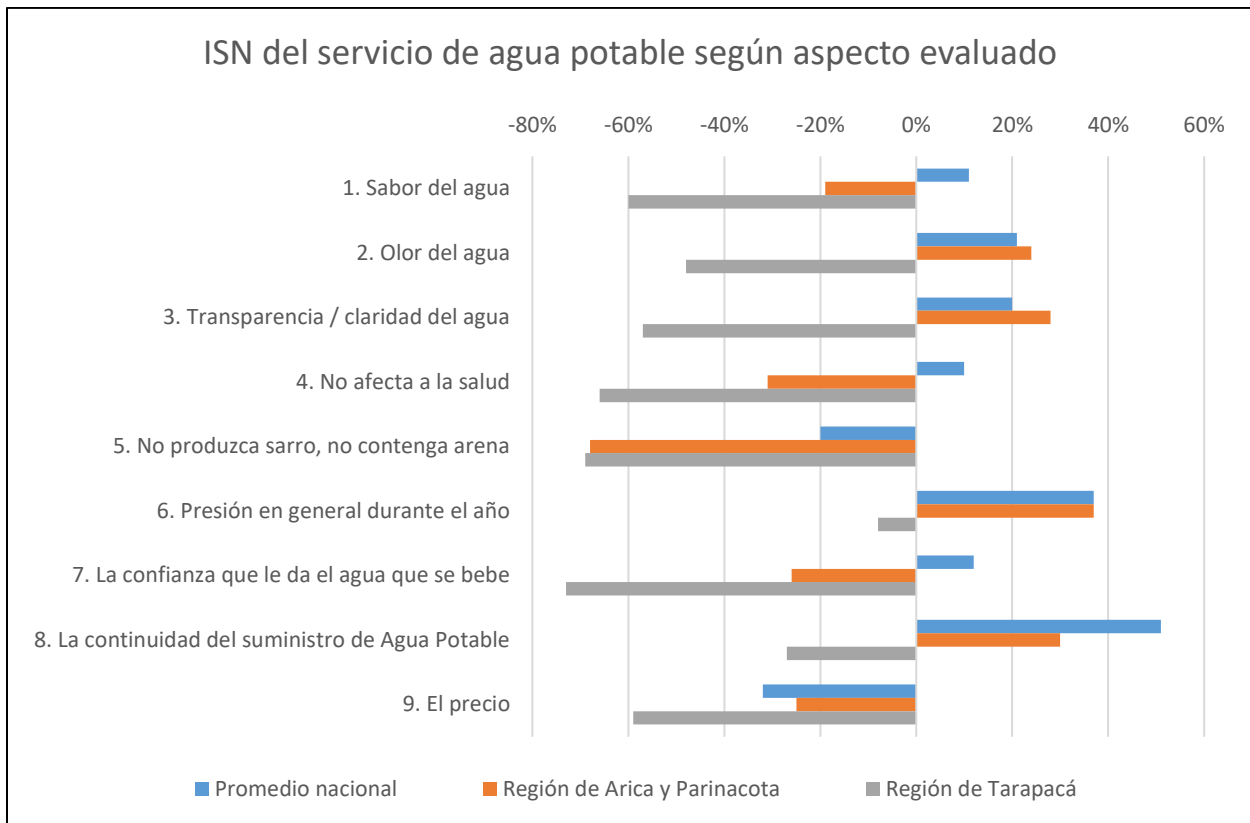


Gráfico 2.7: ISN del servicio de agua potable según el aspecto evaluado, dada la evaluación de los clientes a las empresas sanitarias más importantes del Norte Grande del país, en conjunto con el promedio nacional.

Particularmente, y dado que el presente trabajo contempla una evaluación técnica-económica de mejora del servicio sanitario para el sistema Iquique-Alto Hospicio, se acusa la insatisfacción de los clientes de la empresa Aguas del Altiplano en la Región de Tarapacá, mostrada por el *Gráfico 2.7*, para todos los Aspectos evaluados, siendo máxima en la confianza que les da el agua que se

bebe, y seguida por la aparición de sarro o arena (esta, siendo máxima para la Región de Arica y Parinacota), a niveles muy superiores al promedio nacional. Así, el posible tratamiento de los efectos del AP en la región, supone un gran potencial de mejora en la respuesta perceptiva del cliente, en relación a la calidad del servicio de AP, prestado por las sanitarias.

Se desprenden como observaciones y acotaciones adicionales del informe, los siguientes:

- El promedio de las calificaciones otorgadas por los clientes al servicio de AP según los nueve aspectos evaluados, arroja que el peor evaluado es el precio, seguido por que el agua no produzca sarro, ni contenga arena y luego el sabor del agua, dando a conocer la poca aprobación de aspectos cualitativos del agua para los clientes, sin importar que dichos aspectos dependen de la norma de calidad de agua potable, la cual, por ley, es cumplida por todas las empresas sanitarias.
- El aspecto más importante para el cliente es que el agua no afecte a la salud, seguido por el sabor del agua, los cuales poseen un importante componente subjetivo.
- La nota promedio al servicio del agua potable que entregan las empresas sanitarias, fue de 5,1 (escala de 1 a 7), donde Aguas del Altiplano posee notas bajo el promedio, tanto para su servicio en la XV región con un 4,9, como para la I región con una nota de 4,5. Cabe señalar que, al preguntar por el desempeño global del servicio prestado por las sanitarias, la notas aumentan tres y dos décimas respectivamente.

### **2.1.2 Encuesta de Satisfacción Global, Aguas del Altiplano**

Durante el año 2017, la empresa sanitaria Aguas Nuevas realiza (por medio de la consultora de estudios PRAXIS S.A.) una encuesta para conocer la opinión de los clientes de cada una de sus filiales a lo largo del país, separándolas en las siguientes zonas:

- |                                   |                        |                      |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------|
| 1) Aguas del Altiplano:           | 2) Aguas Araucanía:    | 3) Aguas Magallanes: |
| • Arica / Iquique / Alto Hospicio | • Norte / Centro / Sur | • Magallanes         |

Dicha encuesta, denominada “Estudio de satisfacción global”, contempla atributos relacionados a la percepción del cliente, en evaluando los aspectos; (1) Global de la emp. sanitaria filial, (2) Global del servicio entregado por la emp. sanitaria filial, (3) Canales de contacto, (4) A.P. y Alcantarillado, (5) Obras y trabajos en la vía pública, (6) Corte de suministro y (7) Problemas.

La encuesta se realizó mediante un cuestionario compuesto por 27 preguntas, realizadas a una muestra representativa de clientes de cada filial, alcanzando un total de 2.340 encuestados. De ellos, se analizan aquellas respuestas pertinentes al Norte de Chile, considerando así las 360 respuestas de la XV Región, y las 540 de las I Región, llegando a 900 clientes de Aguas del Altiplano para su análisis.

Debido a que lo importante para analizar, hace relación a la percepción de los clientes con respecto al servicio de agua potable, y particularmente con su calidad, los aspectos más relevantes

a considerar de la encuesta, son los **destacados** en la *Pregunta 6* (de la evaluación global del servicio) y la *Pregunta 11* (de la evaluación del Agua Potable), y que se muestran a continuación.

*Pregunta 6: Usando una escala de 1 a 7 de acuerdo, donde 7 es “muy en acuerdo” ¿Cuál es su nivel de acuerdo con que la sanitaria...?*

1. **Contribuye a la calidad de vida de sus clientes.**
2. *Muestra preocupación por el medio ambiente.*
3. *Es una empresa que informa a sus clientes.*
4. *Es confiable y transparente.*
5. *Responde frente a requerimientos y/o emergencias.*

*Pregunta 11: Usando la misma escala de 1 a 7, ¿Cuál es su nivel de acuerdo con los siguientes aspectos del servicio de Agua Potable que usa en su hogar?*

1. *Siempre tengo buena presión de agua.*
2. *El servicio de agua potable es continuo, nunca se corta.*
3. **El agua siempre es de buena calidad.**
4. **El agua de la sanitaria me da confianza, la tomo con tranquilidad.**
5. *El alcantarillado funciona correctamente, usas el agua y se va.*

Debido a que ninguno de los aspectos mencionados en la encuesta hace relación directa con los efectos del sarro, producto de las aguas duras del norte, los aspectos destacados (negrita) sirven para relacionar la calidad y confianza que perciben los clientes, con respecto al uso de sus aguas, pudiendo referirse indirectamente a los efectos negativos de las aguas duras. Con el promedio de la evaluación de dichos aspectos, se genera el *Gráfico 2.8* (diferenciando ambas regiones donde presta servicios ADA), en el que se observa la poca confianza en el agua para beber, en relación a la percepción de calidad y contribución a la calidad de vida de los clientes.

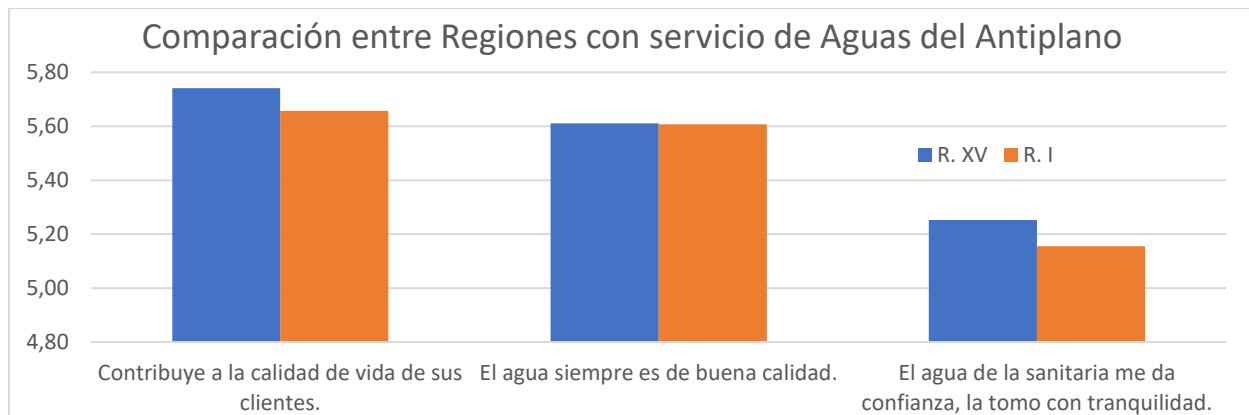


Gráfico 2.8: Del tipo barras o columnas, que presenta los promedios de las notas evaluadas por los clientes, a los 3 aspectos considerados relevantes, para cada región en estudio por separado.

Por otra parte, y dado que el estudio se focaliza en el sistema Iquique-Alto Hospicio, se distribuyen los promedios de las respuestas de los 3 aspectos antes mencionados, pero solo en la Región de Tarapacá, y para cada una de sus localidades contempladas, tal y como muestra el *Gráfico 2.9*, de un total de 540 respuestas de clientes.

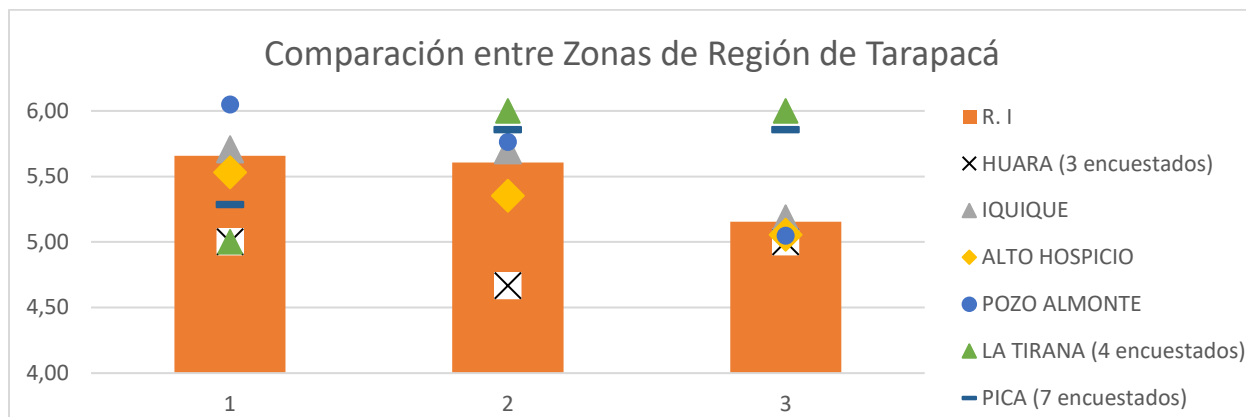


Gráfico 2.9: Del tipo barras o columnas, que presenta los promedios de las notas evaluadas por los clientes, a los 3 aspectos considerados relevantes, para la región de Tarapacá, y también los promedios particulares de cada una de las regiones.

Del gráfico anterior, se observa que las localidades de Iquique y Alto Hospicio siguen una tónica de percepción muy similar al promedio regional, y por otra parte que la calidad de agua potable peor evaluada ocurre en la localidad de Huara (considerar que dicho valor puede no ser representativo, dada la pequeña muestra considerada).

Adicionalmente, si la evaluación del cliente al *Aspecto 3* “El agua siempre es de buena calidad” resulta menor a 7, se realiza la *Pregunta 12* (presentada a continuación), que deja abierta la encuesta para mencionar uno o tres (como máximo) aspectos al debe y que tendría que mejorar el servicio para alcanzar la máxima evaluación.

*Pregunta 12: ¿Qué le falta al servicio de agua potable para que la evalúe con un 7?*

Así, se obtiene que el 59% de los clientes encuestados de ADA evalúan el *Aspecto 3* con una nota menor a 7, mencionando un total de 842 aspectos a mejorar. Luego, estas respuestas se clasifican por tipo de aspecto, donde aquellos relacionados con los efectos de las aguas duras son aquellas que señalan que el servicio necesita; “Menos minerales/desmineralizada” (47%), “Menos sal/menos sabor a sal/menos sodio” (4%), “Menos residuos/sin sarro” (13%) y “Mejor sabor” (36%).

Estos aspectos relacionados a los efectos de las aguas duras, representan el 23% del total de los aspectos mencionados, donde su distribución porcentual se presenta entre paréntesis.

Otro aspecto a analizar, es la evaluación y/o existencia de problemas en el servicio entregado por la sanitaria, siendo pertinentes la *Pregunta 21* y la *Pregunta 22*, presentadas a continuación.

*Pregunta 21: Finalmente, en los últimos 6 meses, ¿ha tenido algún problema con el servicio entregado por la sanitaria?*

*Pregunta 22: ¿Cuál fue el problema que tuvo?*

Finalmente, los clientes de ADA que señalan haber tenido problemas representan el 18% de los encuestados, cuyas respuestas de problemas se categorizan por tipo. Así, aquellos relacionados con los efectos de las aguas duras, entran en la categoría de “Mala calidad del agua / sucia / turbia / con malos olores”. Sin embargo, dicha categoría de problema, que representa el 8% de las

menciones, hace mayor referencia a la calidad perceptual del agua, y no tanto a la presencia de problemas ligados a las aguas duras.

### **2.1.3 Informe de Gestión Sector Sanitario**

Con el fin de dimensionar la importancia de la percepción de calidad del agua potable entregada al cliente, al momento de evaluar la gestión sanitaria, se analiza el último informe de gestión del sector sanitario, actualizado a diciembre de 2017 [23].

Cabe mencionar que, a diciembre de 2017, el sector sanitario urbano, al cual se refiere el informe, está compuesto por 59 concesionarias, de las cuales 54 se encuentran efectivamente en operación, atendiendo áreas de concesión exclusivas en las 15 regiones del país existentes a la fecha. Así, dichas concesiones abarcan un universo de más de 5 millones de clientes residenciales (viviendas) en 397 localidades a lo largo del país.

En particular, el informe analiza las 28 empresas sanitarias principales, que prestan servicios de agua potable y saneamiento de aguas servidas a diciembre 2017, en cuanto a las coberturas del servicio, el consumo de agua potable, las inversiones efectivas y proyectadas, las tarifas cobradas a los usuarios, los resultados financieros de las empresas prestadoras, la calidad del servicio prestado y la percepción de los clientes del sector, entre otros. Así, las empresas analizadas, atienden en conjunto al 99,6% de los clientes de las zonas urbanas del país<sup>22</sup>.

A través del informe, se analiza la gestión de las sanitarias según; (1) Inversiones y reposición, (2) Desempeño operacional y financiero, (3) Calidad del servicio, (4) Sanciones y (5) Residuos industriales líquidos.

Así, lo que compete al presente trabajo de título, hace relación a la calidad del servicio sanitario, donde la SISS mantiene un sistema de indicadores que permiten evaluar la entrega por las distintas empresas, considerando los siguientes atributos:

- Calidad del agua potable.
- Presión del servicio de agua potable.
- Continuidad del servicio de recolección de AS.
- Calidad del tratamiento de aguas servidas.
- Continuidad del servicio de agua potable.
- Otros aspectos de la calidad del servicio.
- Exactitud en el cobro.
- Respuesta de las empresas a reclamos.

El informe señala que, en promedio y a nivel nacional, se logran buenos estándares en cuanto a la calidad del servicio, medida en sus distintas dimensiones. Sin embargo, también se detallan aquellas situaciones que afectan la calidad de los servicios y que deben ser mejoradas por parte de las concesionarias.

---

<sup>22</sup> Cabe mencionar que, de la totalidad de los clientes del sector sanitario, un 96,1% es atendido por empresas operadoras de propiedad privada, mientras que un 3,9% corresponde a usuarios de concesionarias del Estado, de municipalidades o cooperativas.

De los atributos que evalúan el desempeño en cuanto a la calidad del servicio sanitario entregado, el que tiene relación directa con los efectos de las aguas duras, es el referente a la calidad del agua potable. Así, en el apartado “4.1 Calidad del agua potable” del “Capítulo IV Calidad del servicio” [23], se desprenden las siguientes consideraciones:

- El Indicador de Calidad del Agua Potable, se obtiene en base al grado de cumplimiento de los requisitos y condiciones mínimas establecidas en la normativa chilena de calidad; NCh409 “Agua Potable - Parte 1: Requisitos”, y “Parte 2: Muestreo”, tanto a lo referido a la calidad que debe presentar el agua, como al muestreo que se debe realizar para verificarla. Por eso, dicho indicador no representa características que se encuentren fuera del marco normativo, como el caso de la concentración de dureza del agua, y sus efectos indeseables.
- De acuerdo a los resultados del año 2017, el cumplimiento a nivel nacional en todos los atributos de muestreo y calidad de agua potable fue de un 98,75%, levemente inferior al mismo indicador obtenido el año anterior (98,93%).
- La evolución del cumplimiento global de los requisitos de muestreo y calidad para los últimos 10 años, demuestra un buen desempeño general de las empresas sanitarias, ya que se ha mantenido en el rango de 95-99%.

Finalmente, el informe de gestión no abarca conceptos directos de percepción de la calidad del servicio, ni tampoco los efectos provocados por las aguas duras.

#### **2.1.4 Calidad del agua potable en el Norte de Chile**

La producción de agua potable se basa en su obtención desde las denominadas “fuentes de agua”, que producto del ciclo del agua<sup>23</sup>, son los ríos, lagos, aguas subterráneas o incluso el mar. Cada una de estas fuentes posee distintas condiciones de disponibilidad y calidad del agua cruda, por lo que se suelen potabilizar aquellas aguas más accesibles y con menores costos de tratamiento.

Si bien el océano da origen a la mayor parte de las precipitaciones del planeta (principalmente lluvia y nieve), es la lluvia sobre los territorios la que satisface la gran mayoría<sup>24</sup> de las necesidades de agua dulce de los habitantes. Sin embargo, su distribución en el planeta es muy pequeña en comparación a la totalidad del agua existente, tal como se muestra en la *Figura 2.1*, en donde apenas alcanza un 2,5%.

---

<sup>23</sup> El ciclo hidrológico del agua se puede representar en 4 fases; 1) Evaporación, 2) Precipitación, 3) Escurrimiento superficial y 4) Infiltración o percolación.

<sup>24</sup> Pequeña cantidad del agua proveniente de la desalación, pero de gran potencial y en aumento a nivel mundial.

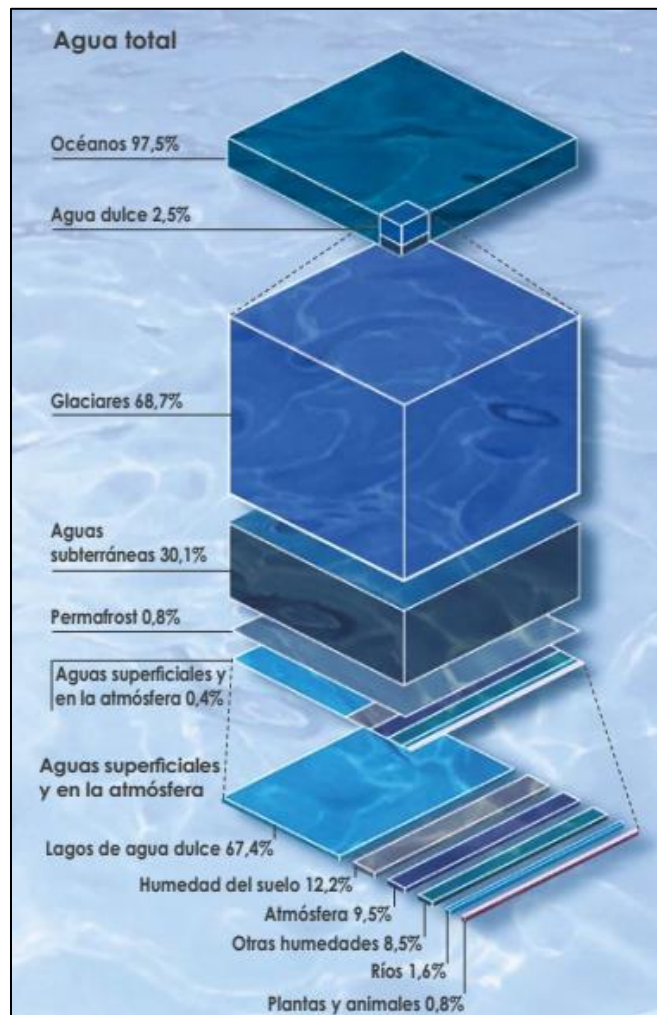


Figura 2.1: Distribución del agua existente en el planeta, detallando la distribución del agua dulce. Fuente: Boletín Aguas Claras N°20, SISS, septiembre 2006.

Además, en la figura anterior se observa que de dicho 2,5% de agua dulce, casi toda se encuentra almacenada en glaciares y capas de hielo, dejando así menos del 1% del agua mundial disponible para usos sanitarios.

Por esto, la gestión del agua dulce en su condición cruda, es fundamental al momento de realizar su potabilización. Afortunadamente, a lo largo del territorio chileno existe una buena disponibilidad de agua dulce para potabilizar, pero de diversas fuentes, las que dependen de la zona geográfica debido el carácter heterogéneo del país, de norte a sur.

Por un lado, en el Norte (macro natural, menos el norte de la región de Valparaíso) el AP tiene su origen principalmente en fuentes subterráneas, dada la escasez relativa del recurso superficial, con la excepción de la región de Antofagasta, que tiene un alto porcentaje de agua de mar desalinizada. En cambio, en el extremo sur, el abastecimiento se basa esencialmente en fuentes superficiales, debido a su abundancia y calidad, y en el centro del país, principalmente desde la región de Valparaíso hasta la región de los Lagos, el abastecimiento es en su gran mayoría mixto.

Lo anterior se ve reflejado en el ya mencionado informe de gestión del sector sanitario de 2017 [23], donde los resultados arrojan que la capacidad máxima de producción de AP en Chile es de 95.559 [l/s], de los cuales el 53,3% corresponde a fuentes subterráneas y el 47,7% a fuentes superficiales<sup>25</sup>.

Así, mientras en el norte del país, de clima seco y napas freáticas profundas, el agua es extraída mediante sondajes, arrastrando con ella una gran cantidad de minerales y elementos; hacia el sur, predominan los climas lluviosos, con numerosas corrientes y ríos superficiales, por lo que su extracción implica solo canalizaciones.<sup>26</sup>

Cabe mencionar que, las fuentes de abastecimiento para la producción de agua potable utilizadas por cada una de las empresas sanitarias, no dependen solo de la disponibilidad del recurso en la zona respectiva, sino que también de la calidad del agua cruda disponible y de la factibilidad técnica y económica de su explotación.

En general las aguas subterráneas son una fuente de agua “pura” por excelencia, siendo cada vez más utilizadas y que, a pesar de tener un mayor costo de explotación (en comparación al agua superficial), generalmente presenta una calidad superior en su condición cruda, requiriendo menores tratamientos a la hora de ser potabilizada. Sin embargo, en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta, domina una calidad de agua insuficiente durante todo el año, principalmente por el contenido de arsénico, limitando su uso prioritario [17], aun cuando es de origen subterráneo, razón por la cual las empresas sanitarias realizan tratamientos pertinentes con el fin de cumplir con las concentraciones de los elementos normados para el AP a distribuir.

Si bien, Chile se abastece de aguas cordilleranas, que en su mayoría no padecen de contaminación humana y cuyo nivel depende de las condiciones físicas en las que se obtiene, cuando se habla de aguas duras, generalmente se refiere a servicios que se abastecen de fuentes subterráneas y presentan una gran concentración de calcio y magnesio, razón por la cual las aguas en el norte son más duras al provenir en su gran mayoría de dichas fuentes [24].

La dureza es una característica natural de las aguas crudas extraídas de los sondajes a lo largo del centro-norte del país, debido principalmente a dos factores, que se acentúan en el norte de Chile:

- 1) La geografía; suelos ricos en minerales y aguas subterráneas con un alto potencial solubilizante, por sus altas concentraciones de ácido carbónico y oxígeno disuelto. Dicha característica se acentúa a mayor profundidad, haciéndola más solvente, y por lo tanto con mayor cantidad de minerales arrastrados.
- 2) La profundidad de captación del agua subterránea; mediante sondajes, que varía entre los 90 y los 130 [m] para Arica, y alcanza los 200 [m] de profundidad para Iquique. Así, estas aguas arrastran gran cantidad de metales y minerales a su paso.

---

<sup>25</sup> Como particularidad, el 1% del agua es del mar, en su calidad desalada, para la Región de Antofagasta.

<sup>26</sup> Cabe mencionar que en la zona centro del país, la extracción es una mezcla casi homogénea entre sondajes y canalizaciones, debido a la diversidad de la condición de las fuentes disponibles.

Adicionalmente, para el norte de Chile, un antecedente que suma inseguridades en los usuarios del agua potable, es el historial de mala calidad de las aguas, en donde la condición actual de un agua con la “mejor calidad de la historia del norte de Chile”, no es valorada como se espera. Posiblemente, esto se deba al desconocimiento general de los esfuerzos, infraestructura y tratamientos que se llevan a cabo para mantener el servicio sanitario en un estándar adecuado.

En el apartado 3.2, se presenta una caracterización más detallada de las aguas producidas y distribuidas en el Norte del país por Aguas del Altiplano, tanto en la XV como en la I Región.

## 2.2 NORMA CHILENA DE AGUA POTABLE

Dado que el presente trabajo se centra en el agua para consumo humano, se debe considerar la normativa NCh1333.Of78 *Requisitos de calidad del agua para diferentes usos* (modificada en 1987) [25], que fija el criterio de calidad del agua de acuerdo a requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según el uso determinado, y que establece como único requisito del agua para consumo humano, que cumpla con la norma NCh409.

Por esto, es la norma NCh409/1.Of2005 *Agua potable – Parte 1: Requisitos* [8], el documento que determina las características que debe tener el agua que se quiera potabilizar en Chile, en la que participan para su preparación los siguientes organismos:

1. División de Normas del Instituto Nacional de Normalización.
2. Superintendencia de Servicios Sanitarios.
3. Organizaciones y personas ligadas al ámbito.

La principal referencia que utiliza la normativa actual, para la determinación de estándares nacionales de calidad de agua potable, es una guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) denominada “Guidelines for drinking-water quality, Volume 1 Recommendations”, del año 2004 [26] (dicha guía se actualiza anualmente, donde la más reciente a la fecha de realización del presente trabajo de título, es la actualización publicada en 2017).

Así, la norma define al agua potable como: “Agua que cumple con los requisitos microbiológicos, de turbiedad, químicos, radiactivos, organolépticos y de desinfección descritos en NCh409/1, que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano”. Así, esta determina requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional, por medio de las siguientes categorías:

Tipo I:	Parámetros microbiológicos y de turbiedad.
Tipo II:	Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud.
Tipo III:	Elementos radiactivos.
Tipo IV:	Parámetros relativos a las características organolépticas.
Tipo V:	Parámetros de desinfección.

De los cuales, el Tipo II y IV se analizan, al mencionar elementos aportantes a la dureza y características organolépticas deseables del agua potable, respectivamente.

Así, la categoría del Tipo II, fija criterios de concentraciones totales máximas para elementos o sustancias químicas presentes en el agua y que son de importancia para la salud, clasificándolas en (1) Elementos esenciales, (2) Elementos o sustancias no esenciales, (3) Sustancias orgánicas, (4) Plaguicidas y (5) Productos secundarios de la desinfección. De ellos, se muestran los elementos esenciales, al presentar aquellos relacionados a la dureza, como el fluoruro, el hierro y en mayor medida el magnesio, tal y como muestra la *Tabla 2.3*. Los elementos mencionados se presentan como iones en el agua que, dependiendo de las condiciones del entorno, pueden precipitar.

Tabla 2.3: Elementos esenciales presentados en la norma NCh409/1.Of2005, en su “Tabla 1”.

Elemento	Expresado como elementos totales	Límite máximo [mg/l]
Cobre	Cu	2,0
Cromo Total	Cr	0,05
Fluoruro	F <sup>-</sup>	1,5
Hierro	Fe	0,3
Manganeso	Mn	0,1
Magnesio	Mg	125,0
Selenio	Se	0,01
Zinc	Zn	3,0

Los límites máximos de los elementos mencionados, nacen de estudios nacionales e internacionales sobre el efecto que causan en la salud de las personas. Si bien el más importante de estos elementos que aportan a la concentración de dureza, resulta ser el magnesio, en general, este corresponde tan solo a la tercera parte de la dureza total, y los dos tercios restantes suelen ser atribuidos casi en su totalidad a la dureza cálcica o calcárea (porción de la dureza total que es determinada por el calcio aportante).

Además, se muestra que no existen concentraciones mínimas de los elementos esenciales del agua debido a que, en la gran mayoría de las aguas crudas, sean subterráneas o superficiales, se encuentran concentraciones suficientes de dichos elementos.

Por otra parte, la categoría del Tipo IV, fija los requisitos a cumplir para obtener un agua de características organolépticas aceptables, tal y como muestra la *Tabla 2.4*.

Tabla 2.4: Parámetros relativos a características organolépticas presentados en la norma NCh409/1.Of2005, en su “Tabla 7”.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo
<b>Físicos:</b>			
Color verdadero	-	Unidad Pt-Co	20
Olor	-	-	inodora
Sabor	-	-	insípida
<b>Inorgánicos:</b>			
Amoníaco	NH <sub>3</sub>	[mg/l]	1,5
Cloruro	Cl <sup>-</sup>	[mg/l]	400 <sup>1)</sup>
pH	-	-	6.5 < pH < 8.5
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	[mg/l]	500 <sup>1)</sup>
Sólidos disueltos totales	-	[mg/l]	1500
<b>Orgánicos:</b>			
Compuestos fenólicos	Fenol	[µg/l]	2
1) La Autoridad Competente, de acuerdo con las instrucciones impartidas por el Ministerio de Salud, podrá autorizar valores superiores a los límites máximos señalados en esta tabla, conforme a la reglamentación sanitaria vigente.			

Cabe destacar que, los criterios más vulnerados en los incumplimientos de normativa sanitaria a lo largo del país, son los organolépticos, como el olor y el sabor, los que en ningún momento pusieron en riesgo la salud de las personas y se relacionaron con dificultades operacionales puntuales [27].

Además, respecto a los aspectos químicos que recomienda la OMS, el pH tiene particular importancia en lo que respecta a la formación de una película protectora sobre la superficie del metal. Por esto, la concentración de carbonato y bicarbonato (alcalinidad) y la concentración de calcio (dureza) también afectan a las velocidades de corrosión de algunos metales.

En términos generales, la dureza total se define como la suma de los cationes polivalentes (que pueden combinarse con más átomos) de Calcio (Ca<sup>+2</sup>) y Magnesio (Mg<sup>+2</sup>). Aun cuando la normativa chilena actual establece límites para el magnesio, se verifica que no existe criterio alguno, concentración máxima, ni parámetros referidos a la presencia de calcio, iones de calcio, calcita o carbonato de calcio, ni menos a la suma de cationes polivalentes, comprobando que la NCh409/1.Of2005 no controla en ningún aspecto la dureza del agua potable.

Adicionalmente, existe otro aspecto que se relaciona con la dureza, denominada Alcalinidad. Según mencionan las guías de la OMS respecto a los aspectos relativos a la aceptabilidad [16], el agua con una dureza mayor a aproximadamente 200 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], en función de la interacción con otros factores como el pH y la alcalinidad, puede provocar la formación de incrustaciones en las instalaciones de tratamiento, el sistema de distribución y las tuberías y depósitos de los edificios. Además, señala que, el control de la alcalinidad y del contenido de calcio también contribuye a la estabilidad del agua y al control de su capacidad corrosiva de tuberías y electrodomésticos.

La alcalinidad<sup>27</sup> del agua, en términos simples, se puede definir como una medida de su capacidad para neutralizar ácidos. En las fuentes de agua, esta propiedad se debe principalmente a la presencia de ciertas sales de ácidos débiles, y no tiene efectos nocivos en los seres humanos, sea alta o baja; sin embargo, las aguas muy alcalinas tienen mal sabor. Habitualmente la alcalinidad se expresa como Alcalinidad Total en [mg/l] de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) [28].

La mencionada norma NCh1333.Of78, en los requisitos generales de aguas destinadas a vida acuática mostrados a continuación por la *Tabla 2.5*, fija un valor mínimo para la Alcalinidad Total, de 20 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], que posee las mismas unidades en las que se mide la dureza total.

Tabla 2.5: Requisitos generales de aguas destinadas a vida acuática presentados en la norma NCh1333.Of78, en su “Tabla 4”.

Características	Requisito
Oxígeno disuelto, [mg/l]	5 mínimo.
pH	6,0 a 9,0
Alcalinidad total, [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	20 mínimo.
Turbiedad debido a descarga, unidades Escala Sílice	No debe aumentar el valor natural en más de 30 unidades.
Temperatura	En flujos de corriente, no debe aumentar al valor natural en las de 3 °C.
Color	Ausencia de colorantes artificiales.
Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales	Ausentes.
Sólidos sedimentables	No deben exceder del valor natural.
Petróleo o cualquier tipo de hidrocarburo	No debe haber detección visual. No debe haber cubrimiento de fondo, orilla o ribera. No debe haber olor perceptible.

Cabe mencionar que la normativa chilena tampoco controla el equilibrio del agua, para saber si esta tiene carácter corrosivo o incrustante. Esta característica se puede conocer mediante el Índice de Langelier o de saturación (método más simple para el cálculo del equilibrio del agua), el cual considera el pH, la temperatura, la alcalinidad y la dureza cálcica, junto con un factor para los sólidos disueltos totales.

Si bien durante el año 2013, la cámara de diputados mostró interés de establecer límites máximos normativos para la dureza del agua en Chile, mediante un proyecto de ley [29], en el cual los diputados firmantes solicitan al actual Ministro de Salud, “iniciar los estudios relacionados con la modificación de la normativa legal vigente y los reglamentos sanitarios en cuestión, a fin de establecer límites máximos para la dureza del agua, incorporando los carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sales de calcio y magnesio, en los análisis realizados por la autoridad sanitaria

<sup>27</sup> Esta capacidad del agua es de suma importancia en procesos de potabilización del agua, ya que la eficiencia del proceso de coagulación depende fuertemente de este parámetro.

sobre la calidad bacteriológica y pureza del agua potable en nuestro país”. Sin embargo, dicho proyecto de ley no tuvo avance alguno en la cámara de diputados, ni en la legislación chilena.

Finalmente cabe mencionar que, a la fecha, la guía de la OMS más reciente [16] sigue sin determinar un valor límite de la dureza del agua según su afectación a la salud por consumo humano. No obstante, la normativa de calidad de agua potable está en constante estudio para sus actualizaciones futuras, con el fin de abarcar estudios recientes, para mejorar y perfeccionar la normativa.

### 2.3 LA DUREZA DEL AGUA

Originalmente, la dureza del agua se reconoce por la capacidad que tiene el agua para precipitar jabón, donde aguas que requieren grandes cantidades de jabón para producir espuma, son clasificadas como aguas duras.

Particularmente, la dureza es causada por cationes metálicos divalentes (con excepción de los metales alcalinos y el ion hidrógeno), los cuales reaccionan con el jabón (base) y con ciertos aniones, formando precipitados y produciendo sarro. Estos cationes, y sus respectivos aniones, se presentan en la *Tabla 2.6* [30].

Tabla 2.6: Cationes divalentes causantes de dureza, y sus respectivos aniones con los que reaccionan, destacando en negrita los controlados por la NCh409/1.Of2005.

Cación Divalente		Anión	
Calcio,	Ca <sup>+2</sup>	Bicarbonato,	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
<b>Magnesio,</b>	<b>Mg<sup>+2</sup></b>	<b>Sulfato,</b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>
Estroncio,	Sr <sup>+2</sup>	<b>Cloruro,</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>
<b>Hierro,</b>	<b>Fe<sup>+2</sup></b>	<b>Nitrato,</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>
<b>Manganeso,</b>	<b>Mn<sup>+2</sup></b>	Silicato,	SiO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>

La concentración de sustancias disueltas en el agua puede variar considerablemente por muchos factores, siendo los más importantes la localización geográfica y la estación del año. Sin embargo, en lo que respecta a los componentes activos, la concentración relativa de iones o microcomponentes más importantes del agua suele ser, en orden decreciente, la siguiente:

- Cationes: Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup>
- Aniones: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup>

Si bien, las concentraciones de estos iones oscilan principalmente entre 1 a 250 [mg/l], el resto de los iones se encuentran en menores concentraciones, llegando incluso a valores bajo 1 [µg/l]. Por otra parte, los principales cationes divalentes en el agua son los iones de calcio y magnesio, constituyendo en conjunto alrededor del 95% de lo reconocido como “Dureza del agua” [31] [32].

Técnicamente, la dureza o dureza total es la suma de los cationes polivalentes (capaces de combinarse con más átomos), pero en la práctica se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, expresadas como carbonato de calcio o carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) en [mg/l],

dada la predominancia de estos minerales en las aguas naturales (crudas). La forma más común de determinarla se muestra en la ecuación (2.1), la que depende directamente, y en distintas proporciones, de las concentraciones de calcio y magnesio, expresadas en [mg/l] [33].

$$\text{Dureza Total} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ de } \text{CaCO}_3 \right] = 2,497 * \left[ \text{Ca}, \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] + 4,118 * \left[ \text{Mg}, \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] \quad (2.1)$$

$$\text{Dureza Total} = \text{Dureza Cálctica} + \text{Dureza Magnésica}$$

- [Ca, mg/l] = Concentración de iones de calcio, expresada en miligramos por litros.
- [Mg, mg/l] = Concentración de iones de magnesio, expresada en miligramos por litros.

### 2.3.1 Origen y formación

Entendiendo la dureza como una medida de la cantidad de minerales disueltos en el agua, principalmente de calcio y magnesio, su concentración depende directamente del tipo de depósito geológico que el agua va atravesando en su camino al acuífero<sup>28</sup>. En este recorrido, el agua erosiona y disuelve distintos tipos de minerales presentes en los suelos, incorporándolos a su flujo.

El poder solvente del agua, proviene de las condiciones ácidas que se desarrollan a su paso por la capa respectiva de suelo, donde la presencia y acción de los microorganismos (principalmente bacterias) genera dióxido de carbono, el cual existe en equilibrio con el ácido carbónico. Bajo estas condiciones, sumadas a un Ph bajo, el agua disuelve las rocas, incorporando compuestos a solución [34], tal y como muestra de manera simplificada el esquema ilustrativo de la *Figura 2.2*.

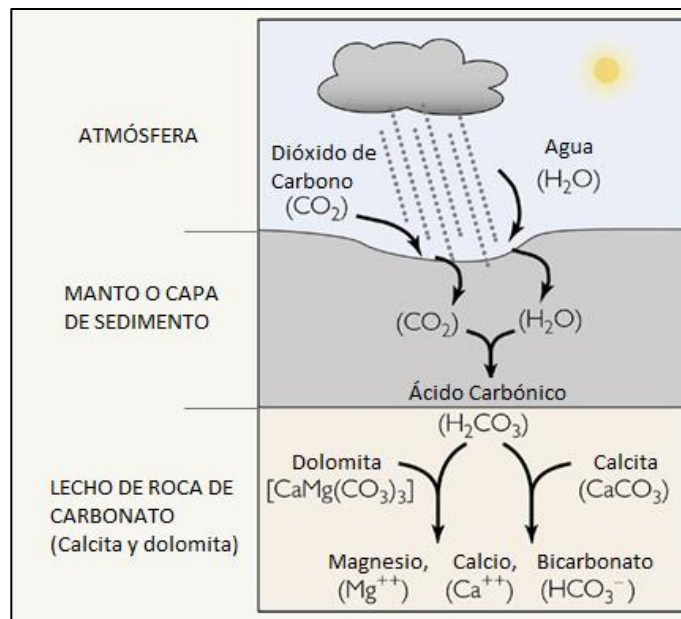


Figura 2.2: Esquema del proceso general de disolución de minerales que determinan la dureza. Fuente: Elaboración propia.

<sup>28</sup> Masa de rocas permeables. Permite la circulación y la acumulación del agua subterránea en sus poros y grietas.

El carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ , es el carbonato más abundante en la naturaleza, pudiendo encontrarse en; diferentes formas minerales cristalinas (estado puro), como calcita o aragonita, también formando rocas sedimentarias, como calizas<sup>29</sup> y margas<sup>30</sup>, y en rocas metamórficas como el mármol<sup>31</sup>. Además, es habitualmente el cemento natural de las areniscas<sup>32</sup>.

El mineral de carbonato de calcio más estable que existe es la calcita, frente a los otros dos polimorfos con la misma fórmula química, pero de distinta estructura cristalina; la aragonita<sup>33</sup> y la vaterita, al ser más inestables y solubles. Además, es un mineral que puede cristalizar en varias formas dando lugar a cristales generalmente blancos o incoloros, y que a veces están teñidos de otras coloraciones [34], tal y como se observa en la *Imagen 2.1*.



Imagen 2.1: Algunas de las apariencias del mineral de calcita en la naturaleza. Fuente: <https://www.mineralesyrocas.top/calcita/>

Centrando el análisis en el calcio, que es elemento causante del sarro duro que se incrusta, su presencia en el agua tiene origen en la disolución de minerales presentes en los suelos, tales como la calcita, el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), y la dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), entre otros menos frecuentes.

---

<sup>29</sup> Roca sedimentaria compuesta mayormente por carbonato cálcico, generalmente en su estructura calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) y otros carbonatos. Se usan en edificación y fabricación de cal.

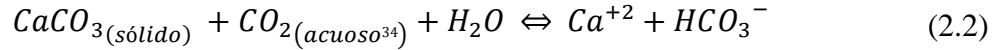
<sup>30</sup> Roca sedimentaria compuesta principalmente por calcita y arcillas, con predominio de la primera.

<sup>31</sup> Roca metamórfica compacta formada a partir de calizas que, sometidas a elevadas temperaturas y presiones, lograron un alto grado de cristalización. Su componente básico es el carbonato cálcico, cuyo contenido supera el 90%.

<sup>32</sup> Roca sedimentaria del tipo clástica, de color variable, y cuyos fragmentos de rocas, minerales o fósiles (clastos) son de tamaño arena (0,063 a 2 [mm]).

<sup>33</sup> También conocido como aragonito, pudiendo encontrarse en forma de estalactitas, en la concha de casi todos los moluscos y en el esqueleto de los corales. Entre sus variedades presentes en la naturaleza, destaca la llamada flosferri (flor de hierro), que se asemeja a un coral [35].

Luego, y si el dióxido de carbono  $CO_2$ , se encuentra en altas concentraciones en el agua, el calcio es fácilmente disuelto, mediante la reacción general que muestra la ecuación (2.2), para la disolución de la calcita sólida.



Por esta razón, la concentración de dióxido de carbono en el agua, determina la cantidad de carbonato de calcio posible de disolver. Además, por características propias de la naturaleza, las formaciones calizas contienen impurezas, tales como sulfatos, cloruros y silicatos, los que también son disueltos en el agua que percola en los subsuelos.

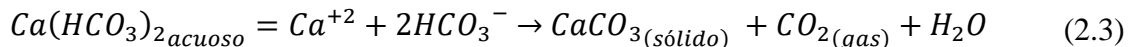
Cabe destacar que, aun cuando el  $CO_2$  que puede disolverse en el agua a través de su equilibrio con la atmósfera es relativamente bajo, su mayor parte proviene de la respiración de microorganismos, debido a la acción de degradación de la materia orgánica existente tanto en las aguas, como en los sedimentos y suelos.

Finalmente, se destaca que el  $CaCO_3$  es una sal que no se encuentra en las aguas naturales, pero que se utiliza como una cantidad equivalente para poder determinar cuantitativamente dureza.

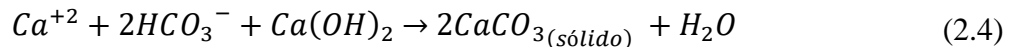
### 2.3.2 Tipos de dureza

Generalmente, se dice que el agua es dura cuando su contenido de iones de calcio y magnesio disueltos excede lo tolerado para el uso al que se destina dicha agua, por lo que no hay un único valor máximo. Sin embargo, es posible realizar una categorización de la dureza de acuerdo a la asociación entre sales de calcio y magnesio, con iones de bicarbonatos, de la siguiente forma:

- A. **Dureza carbonácea o de carbonatos:** también llamada temporal, debido a que puede ser eliminada mediante ebullición del agua, y posterior filtración de los precipitados formados. Es aquella que genera incrustaciones en los materiales, ya que los iones de calcio y magnesio se encuentran en forma de bicarbonatos y/o carbonatos. La eliminación por descomposición térmica de estas sales (como el bicarbonato de calcio  $Ca(HCO_3)_2$ ), ocurre generalmente como muestra la reacción de la ecuación (2.3) [36].



Cabe mencionar que este tipo de dureza también se puede eliminar adicionando hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ), tal y como se muestra en la reacción de la ecuación (2.4).



Así, los compuestos más comunes, que determinan la dureza carbonácea son:

- Bicarbonato de Calcio ( $Ca(HCO_3)_2$ ).
- Bicarbonato de Magnesio ( $Mg(HCO_3)_2$ ).

---

<sup>34</sup> Elemento en solución, diferenciado del estado líquido ya que este se refiere al estado de la materia uniforme, con un 100% de dicho elemento. Así, acuoso se refiere a aquello que está en algún tipo de solvente.

- Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).<sup>35</sup>
  - Carbonato de Magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ).
- Este tipo de dureza corresponde a la porción de la dureza total que es equivalente a la alcalinidad de carbonatos y bicarbonatos, por lo que cuando ambos parámetros se miden como  $\text{CaCO}_3$ , se obtienen las siguientes relaciones:
- Si Alcalinidad < Dureza Total → Dureza Carbonácea = Alcalinidad.
  - Si Alcalinidad  $\geq$  Dureza Total → Dureza Carbonácea = Dureza Total.

B. **Dureza no carbonácea o de no carbonatos:** también llamada permanente, ya que no puede ser removida o precipitada mediante ebullición del agua. Esta dureza no genera incrustaciones en otros materiales, y sus cationes se asocian con los aniones de sulfatos, cloruros y nitratos. Estos son más solubles conforme sube la temperatura, pero hasta cierto valor, ya que luego su solubilidad disminuye al aumentar la temperatura. Para la eliminación de este tipo de dureza en el agua, son necesarios procesos químicos.

Los compuestos más comunes, que determinan la dureza no carbonácea son [36]:

- Sulfato de Calcio ( $\text{CaSO}_4$ ).
- Sulfato de Magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ).
- Cloruro de Calcio ( $\text{CaCl}_2$ ).
- Cloruro de Magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ).

Una forma sencilla de calcular este tipo de dureza es restando la carbonácea a la dureza total. Si bien el método de eliminación de dureza no carbonácea más utilizado es el de precipitación con cal, que en términos generales consiste en añadir carbonato de sodio (soda,  $\text{NaCO}_3$ ) e hidróxido de calcio (cal,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), también es posible eliminarla filtrando el agua a través de ceolitas<sup>36</sup> naturales o artificiales, las que absorben los iones metálicos causantes de dureza, y liberan iones de sodio en el agua. Cabe mencionar, que la mayoría de los detergentes contienen ciertos agentes separadores que inactivan las sustancias causantes de dureza no carbonácea.

### 2.3.3 Clasificaciones

Con respecto a la dureza de las aguas, se suele clasificar como agua blanda aquella con una concentración relativamente baja de carbonato de calcio y otros iones, así como también a aquella que, mezclada con jabón, genera espuma fácilmente. Por el contrario, aguas con altas concentraciones de minerales, son conocidas como aguas duras.

Así, el agua en su esencia es “blanda”, sin embargo, adquiere diferentes niveles de dureza en su recorrido a los puntos de abastecimiento, transcurriendo por las diversas fases hidrológicas en las cuales absorbe los distintos minerales que la dejan en el estado antes mencionado.

---

<sup>35</sup> El carbonato de calcio es menos soluble en agua caliente que en agua fría, por lo que, al hervir el agua, además de contribuir a la formación de carbonato, el bicarbonato de calcio se precipitará fuera de la solución.

<sup>36</sup> También denominadas zeolitas, son minerales microporosos, que destacan por su capacidad de hidratarse y deshidratarse reversiblemente.

Por esta razón, en depósitos de lecho de roca<sup>37</sup>, el agua suele ser blanda (agua más bien sódica<sup>38</sup>) a pesar del alto grado de mineralización y, por el contrario, la mayoría de acuíferos producen aguas duras, lo que se acentúa con la profundidad de estos.

Entonces, y al no existir un nivel de dureza perjudicial para la salud, o para la utilización de esta en algún proceso, existen variadas clasificaciones de dureza, siendo la más importante a nivel mundial la considerada por la OMS [13], que clasifica la dureza basándose en los estudios presentados por Mcgowan (2000, [12]), y fija los rangos presentados en la *Tabla 2.7*.

Tabla 2.7: Clasificación de la dureza del agua, considerada por la Organización mundial de la Salud.

Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	Clasificación OMS
< 60	Blanda
60 - 120	Moderadamente dura
121 - 180	Dura
> 180	Muy dura

Si bien, esta clasificación también es considerada en Norteamérica por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS<sup>39</sup>, United States Geological Survey [14]), a nivel residencial e internacional, se utiliza la clasificación recomendada por la Asociación de Calidad de Agua (WQA<sup>40</sup>, Water Quality Association [15]) que muestra la *Tabla 2.8*, la cual está orientada a un menor rango de estudios que la primera.

Tabla 2.8: Clasificación de la dureza del agua, considerada por la Asociación de Calidad de Agua.

Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	Clasificación WQA
< 17,1	Blanda
17,1 - 60	Ligeramente dura
61 - 120	Moderadamente dura
121 - 180	Dura
> 180	Muy dura

Además, en otras partes del mundo, la dureza del agua se clasifica según los estudios realizados por Jairo Romero (2002, [37]), y que se presenta en la *Tabla 2.9*.

Tabla 2.9: Clasificación de la dureza del agua, considerada por Jairo R.

Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	Clasificación Jairo R.
< 75	Blanda
75 - 200	Moderadamente dura
201 - 300	Dura
> 300	Muy dura

<sup>37</sup> También llamada cama de roca, se refiere a una o un conjunto de rocas macizas que se encuentran en la superficie de la tierra o que subyacen bajo ella.

<sup>38</sup> Denominada así al agua con una concentración de sodio mayor a 200 [mg/l].

<sup>39</sup> Es una agencia científica del gobierno federal de Estados Unidos.

<sup>40</sup> Es una asociación internacional sin fines de lucro, de distribuidores y fabricantes de equipos de tratamiento de agua a nivel industrial, comercial y residencial.

Cabe mencionar que cada una de las clasificaciones presentadas se basan en valores de dureza esperadas para aguas potables, que cumplen criterios internacionales de aceptabilidad. De hecho, algunas consideraciones que hacen las guías de recomendaciones de la OMS [16], respecto a criterios de aceptabilidad del agua potable, además de señalar que el umbral gustativo comprobado del ión calcio se encuentra entre 100 y 300 [mg/l] (dependiendo del anión asociado, mientras que el del magnesio es probablemente menor, en algunos casos, los consumidores toleran una dureza del agua mayor que 500 [mg/l], debido a que aceptabilidad por parte de la población del grado de dureza del agua, varía considerablemente de una comunidad a otra), se destaca que durezas mayores a aproximadamente 200 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] (dependiendo de la interacción con otros factores, como el pH y la alcalinidad), pueden provocar:

- Formación de incrustaciones en: Instalaciones de tratamiento, sistemas de distribución, tuberías, depósitos de edificios y consumo excesivo de jabón (formación de restos insolubles de este).
- Formación de precipitados, de carbonato de calcio, al calentarlas.

Además, estas guías de recomendaciones también señalan que las aguas con dureza menor a 100 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] pueden tener una capacidad de amortiguación del pH baja y ser, por tanto, más corrosivas para las tuberías de agua. Sin embargo, estas no proponen ningún valor de referencia (mínimo o máximo) para la concentración de dureza en el agua de consumo humano, asociado a efectos sobre la salud.

Como se menciona anteriormente, en Chile no está normada la dureza del agua, por lo que no se considera alguna clasificación en particular para cuantificar el nivel de dureza. Por otra parte, y dadas las características geográficas del país, sus aguas tienen una gran concentración de minerales, si se compara con los promedios conocidos a nivel mundial. Así, al clasificarlas con las escalas presentadas, la gran mayoría de las aguas chilenas (independiente de su fuente), son catalogadas como “Muy duras”.

Entonces, se hace necesario utilizar alguna clasificación que represente de mejor manera los niveles de dureza encontrados en las aguas del país, y realizar así una correcta diferenciación. Para esto, se utiliza la propuesta de clasificación para las aguas chilenas presentada en la Memoria de Marco Neira [38], mostrada a continuación en la *Tabla 2.10*.

Tabla 2.10: Propuesta de clasificación de la dureza para aguas chilenas, por Marco A. Neira Gutiérrez, en su memoria de titulación de nombre “Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile.”

Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	Clasificación Marco Neira
< 100	Blanda
100 - 300	Moderadamente blanda (dura)
301 - 500	Dura
>500	Muy dura

De hecho, tal como se detalla más adelante, en Chile existen numerosas fuentes de agua que bordean los 500 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], incluso alcanzando durezas superiores a los 1.000 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], en algunas fuentes.

Cabe mencionar, que el agua si necesita un grado aceptable de mineralización, ya que la mayoría de los minerales naturales de las aguas crudas son necesarios para el metabolismo de los seres vivos. Además, aguas demasiado blandas son altamente corrosivas para estos organismos.

#### 2.3.4 Otras unidades

Que la forma más común para cuantificar la dureza de las aguas sea en [mg/l] o ppm<sup>41</sup> de carbonato de calcio, se debe principalmente a que el peso molecular de este es muy cercano a 100 [gr/mol]<sup>42</sup>, lo que facilita los cálculos. Sin embargo, existen otras unidades alternativas que se utilizan en distintos países para expresar la dureza, donde las más importantes son:

- Grado Francés [°fH] = 10 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>].
- Grado Inglés o grado Clark [°eH] = 14,25 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>].
- Grado Americano = 17,2 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>].
- Grado Alemán (Deutsche Härte) [°dH] = 17,85 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>].

Adicionalmente, existen índices que se relacionan directa o indirectamente con la dureza del agua. El más importante de ellos es el índice de Langelier (IL), el cual se define como la diferencia entre el pH efectivo de un agua y su “pH de saturación”, o pH al cual un agua con la misma alcalinidad y dureza de calcio estaría en equilibrio con carbonato cálcico sólido. Así, las aguas con un IL positivo tienen capacidad de depositar incrustaciones de carbonato de calcio de la solución.

Por lo general, las aguas con pH, contenido de calcio y alcalinidad altos son menos corrosivas, y suelen tener un IL positivo. Sin embargo, estos índices de precipitación de carbonato cálcico no necesariamente se consideran buenos para la predicción de la corrosión en sistemas de cobre [16].

#### 2.3.5 Determinación

Como se menciona anteriormente, la forma más precisa para calcular la dureza del agua es a partir de mediciones de calcio y magnesio, determinando así la dureza total mediante la ecuación (2.1). Para ello, existen variados métodos de medición, los que se presentan a continuación:

- A. **Método del Jabón:** consiste en titular<sup>43</sup> el agua con una solución de jabón de concentración conocida, donde el indicador es la propia espuma del jabón, que se forma cuando toda la dureza se ha consumido, es decir, luego de que este jabón (de sodio) se ha combinado, principalmente, con los iones de calcio y magnesio para formar jabones insolubles. Así, se puede cuantificar

---

<sup>41</sup> Partes por millón.

<sup>42</sup> Técnicamente, su peso molecular es 100,0869 [gr/mol].

<sup>43</sup> Proviene de la titulación, y hace referencia a un procedimiento cuantitativo analítico de la química. Mediante titulación, se puede determinar la concentración desconocida en un líquido añadiéndole reactivos de un contenido conocido.

la espuma generada luego de que toda la dureza se haya consumido con un volumen de solución de jabón que se puede determinar [39].

- B. **Método Gravimétrico:** método analítico más preciso para determinar la dureza total en aguas de composición desconocida. En él, se determina el calcio mediante su precipitación como oxalato ( $\text{CaC}_2\text{O}_4$ ), el que luego se calcina para transformarlo en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ). Por otra parte, el magnesio se determina precipitándolo como ortofosfato de magnesio ( $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), el que también se calcina para transformarlo en pirofosfato de magnesio ( $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ). Finalmente, la dureza total se calcula sumando el calcio y el magnesio de los residuos calcinados [39].
- C. **Método volumétrico o EDTA:** corresponde al método analítico más utilizado y recomendado, en el mundo, para determinar la dureza total del agua. En él, se titula una muestra de agua (cuyo Ph se ha amortiguado previamente con un agente orgánico secuestrante, para mantenerlo entre 6 y 8), con una solución de sal de sodio del ácido etilendiaminotetracético (EDTA), en presencia de un colorante que sirve de indicador. Si se titula una segunda alícuota de la muestra en presencia de otro indicador y otro amortiguador, se efectúa una determinación por separado del calcio, diferenciando así el calcio del magnesio. Además, y si las interferencias no sobrepasan los límites especificados, el método volumétrico es tan preciso como el gravimétrico [40].
- D. **Métodos avanzados:** si bien están libres casi de la totalidad de las interferencias, no se pueden usar como métodos de control rutinario, por el alto costo del instrumental requerido y el nivel de calificación del analista. Ejemplos de estos métodos son la absorción atómica y plasma.

### 2.3.6 Estudios sobre los efectos para la salud

El calcio y el magnesio son nutrientes importantes en el desarrollo y mantenimiento de la salud humana. Estos componentes de la dieta (así como también el fósforo) están intensamente asociados con el desarrollo de huesos y dientes fuertes, y además son esenciales para la función cardiovascular. De hecho, aproximadamente el 99% de las reservas de calcio del cuerpo se encuentran en los huesos y los dientes, con pequeñas cantidades en los tejidos y fluidos corporales necesarios para la contracción muscular, la transmisión nerviosa y las secreciones glandulares [41].

Por otra parte, una porción más pequeña (60-65%) del magnesio del cuerpo se encuentra en los huesos. El magnesio es un cofactor de más de 350 reacciones enzimáticas, muchas de las cuales involucran metabolismo energético. También está involucrado en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos y es necesaria para el tono vascular normal y la sensibilidad a la insulina. Así, tanto el calcio como el magnesio en la dieta, pueden desempeñar un papel en la etiología<sup>44</sup> de la osteoporosis y las enfermedades cardiovasculares.

En las guías de recomendaciones de la OMS [16], no hay un requisito definido por un indicador específico que se deba cumplir para la ingesta diaria de Calcio, independiente que exista una

---

<sup>44</sup> Parte de la medicina que estudia el origen o las causas de las enfermedades.

Ingesta Adecuada (AI, Adequate Intake) para cada rango etario, no así para el caso del magnesio, que si posee un EAR (Requisito Promedio Estimado) y un RDA (Asignación dietética Recomendada), tal y como muestra la *Tabla 2.11*, según los consensos internacionales de ingestas dietéticas de referencia (DRIs, Dietary Reference Intakes [41]).

Tabla 2.11: Recomendaciones internacionales de ingestas diarias de calcio y magnesio (<sup>a</sup> hombre/mujer). Traducido de [41].

Grupo	Ingesta diaria [mg/día]			
	Calcio	Magnesio		
	AI	AI	EAR	RDA
0-6 meses	210	30	-	-
7-12 meses	270	75	-	-
1-3 años	500	-	65	80
4-8 años	800	-	110	130
9-13 años	1300	-	200	240
14-18 años	1300	-	340/300 <sup>a</sup>	410/360 <sup>a</sup>
19-50 años	1000	-	330/225 <sup>a</sup>	400/310 <sup>a</sup>
>50 años	1200	-	350/265 <sup>a</sup>	400/310 <sup>a</sup>
Embarazo				
<18 años	1300	-	335	400
19-30 años	1000	-	290	350
31-50 años	1000	-	300	360
Lactancia				
<18 años	1300	-	300	360
19-30 años	1000	-	255	310
31-50 años	1000	-	265	320

A continuación, se explica la relación entre los componentes de las aguas duras y el impacto en la salud de sus consumidores.

#### 1) El Calcio:

Como catión divalente, es el más abundante en el organismo de los seres humanos, aportando cerca del 1,5 a 2% del peso total, concentrados casi en su totalidad en huesos y dientes. Juega un papel importante en la transmisión neuromuscular de estímulos químicos y eléctricos, en el correcto funcionamiento del sistema de conducción miocárdica, en la coagulación de la sangre y en la transmisión de información intracelular. Además, es el responsable de funciones estructurales que afectan el esqueleto y los tejidos blandos.

Además, y como se menciona anteriormente, el calcio es el mineral más típico de las aguas naturales, y el predominante en las aguas duras. En la mayoría de las aguas dulces alrededor del mundo, su concentración varía entre 2 y 200 [mg/l] (como Ca, pero como CaCO<sub>3</sub> en el rango 5-500). A continuación, en la *Tabla 2.12* se presenta la concentración promedio de calcio en las aguas potables de algunas ciudades del mundo [42], y también en algunas regiones de Chile [38].

Tabla 2.12: Concentración promedio de calcio en las aguas potables de algunas ciudades del mundo, y algunas regiones de Chile. Destacar que se muestra el promedio regional chileno máximo y mínimo, de la III y la IX Región respectivamente.

Ciudades o Regiones	Concentración de Calcio [mg/l]
París (Francia)	90
Nueva York (EEUU)	18,8
Phoenix (EEUU)	131
Monterrey (México)	90
La Paz (México)	60
Regiones XV y I (Chile)	110,5
Región de Atacama (R.III, Chile)	182,2
Región Metropolitana (RM, Chile)	133,9
Región de la Araucanía (R.IX, Chile)	8,9
Región de Magallanes (R.XII, Chile)	30,1

El consumo diario recomendado (AI), por estándares internacionales, para un adulto está en entre el rango de 1000 a 1300 [mg/día], el cual varía entre los distintos grupos etarios de la población, alcanzando un mínimo de 210 [mg/día] para el grupo entre los 0 a los 6 meses de vida, tal y como muestra la *Tabla 2.11*.

Así, el nivel máximo seguro o tolerable de ingesta por encima del cual la ingesta habitual puede producir un efecto adverso para la salud se estableció en 2.500 [mg/día] para el calcio en algunos informes internacionales [41]. Sin embargo, la evidencia epidemiológica indica que el calcio en la dieta reduce la incidencia de cálculos renales. Por el contrario, los resultados de un gran ensayo aleatorizado sugieren un mayor riesgo de cálculos renales asociados con suplementos de calcio, posiblemente porque el calcio se ingirió como un bolo y no con alimentos, o los suplementos fueron tomados por aquellos que excedieron el nivel máximo de ingesta [13].

A modo de ejemplo, en la *Tabla 2.13* se presentan algunos de los líquidos y alimentos más comunes, que poseen concentraciones importantes de calcio, y que se incorporan al organismo humano por medio de la ingesta.

Tabla 2.13: Contenido de calcio en líquidos y alimentos. \*Considera concentración media general de aguas mundiales, de 50 [mg/l].

Contenido de calcio [mg]	
2 [l] de agua natural*	100
2 [l] de agua embotellada	20
1 taza de yogurt (200 [ml])	450
100 [gr] de queso panela (tipo de queso fresco)	400-700
1 taza de leche descremada (200 [ml])	120
1 lata de sardinas (300 [gr])	680
100 [gr] de almendras	240
4 tortillas de maíz	400
1 taza de porotos	440

De la tabla se observa que el agua, por más alto contenido de calcio que tenga, solo aporta un pequeño porcentaje, al compararlo con el aporte de la dieta. Así, el exceso de calcio por lo regular no es dañino ya que el organismo tiene la capacidad de absorber lo que necesita y desechar el

exceso, al menos de que la persona tenga una condición genética particular, que no le permita regular sus niveles de calcio.

De llegar a comprobarse que el agua con alta concentración de calcio genera problemas a la salud, las personas tendrían que dejar de comer o reducir considerablemente su aportación de calcio por ingesta, antes de disminuir su consumo de agua.

Cabe mencionar que la osteoporosis<sup>45</sup> y la osteomalacia<sup>46</sup> son las manifestaciones más comunes de la deficiencia de calcio en el organismo, así como también, pero en un menor grado, esto puede causar hipertensión<sup>47</sup>.

## 2) El Magnesio:

Si bien, la presencia del magnesio en el cuerpo humano alcanza apenas un 0,05% del peso total, este se encuentra más distribuido que el calcio. Así, del total del magnesio en el cuerpo, aproximadamente un 60-65% está en los huesos, un 27% en los músculos, entre un 6 y un 7% en otras células y un 1% en los líquidos extracelulares. Tiene una importante participación como cofactor y activador de más de 300 reacciones enzimáticas, incluyendo la glicólisis, el metabolismo de ATP, la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, la contracción y relajación muscular, en la excitabilidad neuromuscular, y en el transporte de elementos como el sodio, el potasio y el calcio a través de membranas celulares [43] [44].

El magnesio, por lo general, corresponde a una tercera parte de la dureza total de las aguas naturales, siendo el resto causada principalmente por el calcio. Si bien es un mineral que no es tan predominante en el agua como el calcio, del 98% del peso de la corteza continental<sup>48</sup>, el magnesio es el octavo elemento químico más abundante (siendo el oxígeno el primero y el calcio el quinto [45]), siendo el componente principal de muchos minerales, como la dolomita, la magnesita y muchas variedades de arcilla. Por esto, su presencia en las aguas que lo integran a solución, no deja de ser importante, donde su concentración típica en ellas se encuentra entre 10 a 50 [mg/l] (como Mg, pero como CaCO<sub>3</sub> en el rango 40-200) [46].

A continuación, en la *Tabla 2.14* se presenta la concentración promedio de magnesio en las aguas potables de algunas ciudades del mundo [42], y también en algunas regiones de Chile [38].

---

<sup>45</sup> Enfermedad esquelética en la que se produce una disminución de la densidad de masa ósea.

<sup>46</sup> Síndrome que se caracteriza por un reblandecimiento de los huesos debido a la pérdida de sales calcáreas, causado por una carencia de vitamina D.

<sup>47</sup> Presión excesivamente alta de la sangre, sobre la pared de las arterias.

<sup>48</sup> Compuesta por los continentes y sus plataformas continentales, tiene en promedio un grosor de 35 [km].

Tabla 2.14: Concentración promedio de magnesio en las aguas potables de algunas ciudades del mundo, y algunas regiones de Chile. Destacar que se muestra el promedio regional chileno máximo y mínimo, de la III y la XI Región respectivamente.

Ciudades o Regiones	Concentración de Magnesio [mg/l]
París (Francia)	18
Nueva York (EEUU)	3,8
Phoenix (EEUU)	26,2
Monterrey (México)	18
La Paz (México)	12
Regiones XV y I (Chile)	17,9
Región de Atacama (R.III, Chile)	38,7
Región Metropolitana (RM, Chile)	16,1
Región de la Araucanía (R.IX, Chile)	4,0
Región de la Aysén (R.XI, Chile)	2,4
Región de Magallanes (R.XII, Chile)	6,46

El consumo diario recomendado como requisito (EAR) de magnesio para un adulto sano, se encuentra entre los 300 a 400 [mg/día] el cual varía entre los distintos grupos etarios de la población, alcanzando un mínimo de 65 [mg/día] para el grupo entre los 1 a los 3 años de vida, y un mínimo absoluto, referente a la ingesta adecuada (IA), de 30 [mg/l] entre los 0 y 6 meses de vida, tal y como muestra la *Tabla 2.11*.

Al igual que el calcio, el magnesio suele ser recomendado para su ingesta a través de la dieta, debido al gran número de funciones que desempeña en el organismo. A continuación, en la *Tabla 2.15*, se presentan los principales alimentos ricos en magnesio, y que tienen propiedades positivas para la salud humana [47].

Tabla 2.15: Alimentos de mayor concentración de magnesio, y su respectiva cantidad por cada 100 [gr] de este.

100 [gr] de alimento	Contenido de Magnesio [mg]
Semillas de girasol	450
Almendras	270
Maní	210
Legumbres; garbanzo, lenteja o poroto	120-140
Nueces	120
Pistachos	120
Chocolate negro (al menos 70% de cacao)	100
Pan integral	90
Higos secos	80

Si bien no se ha establecido ningún nivel máximo de ingesta del magnesio, por consumo de alimentos, relacionado efectos adversos a la salud, los estudios internacionales señalan máximos para la ingesta adicional de magnesio como suplemento, con rangos entre los 250 y 350 [mg/día]. Así, considerando su concentración en las aguas potables como una forma de suplemento, los países suelen limitar el magnesio [41]. Cabe recordar que la concentración máxima de magnesio, normada para el agua potable de Chile, es de 125 [mg/l].

Se ha comprobado que consumos de magnesios menores a los requeridos, pueden generar un déficit tal para el organismo humano, que aumenta el riesgo de desarrollo de variadas patologías,

como la vasoconstricción<sup>49</sup>, hipertensión, arritmia cardíaca<sup>50</sup>, aterosclerosis vascular<sup>51</sup>, infarto agudo al miocardio<sup>52</sup>, eclampsia<sup>53</sup> en mujeres embarazadas, y posiblemente diabetes tipo II<sup>54</sup> y osteoporosis [43] [44].

### 3) La dureza:

Como el agua de consumo humano es una fuente esencial de elementos como el calcio y magnesio para la dieta diaria, algunas enfermedades podrían relacionarse con la dureza presente en el agua de consumo, por lo que a continuación, se presentan las más controversiales, con las que se les suele relacionar.

#### **A. Enfermedades cardiovasculares:**

Este tipo de enfermedades están entre las principales causas de mortalidad en el mundo, y particularmente en Chile son la principal causa de muerte en la población general.

Si bien, las conductas y factores de riesgo más importantes de estas enfermedades son la hipertensión, el tabaquismo, el abuso de alcohol, los hábitos alimenticios y la inactividad física [48], estos no explican en totalidad la variabilidad de la mortalidad por estas enfermedades en los diferentes países. Por esta razón, se han investigado relaciones con los factores ambientales, como la polución del aire, el clima o el contenido de minerales en el agua potable (aquella que se consume).

Así, desde 1950 se ha buscado alguna relación entre la dureza del agua potable y algunas enfermedades cardiovasculares, donde muchos de los estudios epidemiológicos que se han realizado al respecto, arrojan una relación inversa entre la dureza de las aguas potables y estas enfermedades, sin embargo, en otros estudios esta asociación no se ha evidenciado [48] [49] [50].

Estudios más recientes, que incorporan nuevas variables como factores climáticos (precipitaciones y/o temperaturas), geográficos, socioeconómicos e incluso los factores de riesgo descritos para enfermedades cardiovasculares, siguen encontrando la relación inversa con la dureza del agua, cuando se controlan factores climáticos y socioeconómicos [51] [52], así como también cuando se consideran factores de riesgo [53] [54].

Luego de más de 60 años de investigaciones respecto al tema, se han presentado diversas hipótesis para explicar la relación entre la dureza del agua potable y las enfermedades cardiovasculares, las que se resumen a continuación:

---

<sup>49</sup> Disminución del calibre de un vaso por contracción de las fibras musculares.

<sup>50</sup> Trastorno de la frecuencia cardíaca (pulso) o del ritmo cardíaco.

<sup>51</sup> Enfermedad en la que se deposita placa dentro de las arterias.

<sup>52</sup> Enfermedad cardíaca frecuente en la que se produce una muerte (necrosis) de las células del músculo cardíaco (miocardio) debido a una falta prolongada de oxígeno (isquemia).

<sup>53</sup> Enfermedad que se caracteriza por convulsiones seguidas de un estado de coma.

<sup>54</sup> Trastorno metabólico que se caracteriza por hiperglucemia (nivel alto de azúcar en la sangre) en el contexto de resistencia a la insulina y falta relativa de insulina.

1. Posible existencia de un efecto protector de otros posibles elementos presentes en pequeña cantidad en el agua dura como, por ejemplo, el litio, selenio, vanadio, silicio y cinc.
2. Las aguas blandas favorecen el ingreso de metales pesados dañinos al organismo, debido al fenómeno de corrosión de los estanques y de las redes de distribución de agua potable. Uno de esos metales pesados es el plomo, el cual, se ha asociado largamente con enfermedades como la hipertensión y también con ataques fulminantes.
3. El alto consumo de calcio y magnesio por ingesta de agua dura proporciona un suministro adecuado de estos minerales a la dieta. El rol de estos minerales, en el desarrollo de la hipertensión, ha sido investigado extensamente, mostrando una baja incidencia de esta enfermedad en poblaciones con una dieta rica en calcio y magnesio. Por otra parte, las aguas blandas pueden producir pérdidas de calcio y magnesio en la elaboración de los alimentos, limitando su disponibilidad en el organismo.

Finalmente, la OMS plantea que, aunque hayan pruebas de estudios epidemiológicos del efecto protector del magnesio y de la influencia positiva de la dureza en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, se vienen debatiendo las pruebas y estas no prueban la causalidad, por lo que de momento no hay datos suficientes para sugerir concentraciones mínimas o máximas de estos minerales, ya que la ingesta adecuada dependerá de una serie de otros factores.

#### **B. Litiasis urinaria:**

También denominada urolitiasis, es una enfermedad relacionada a la formación de una masa sólida de pequeños cristales en el aparato urinario (riñones, uréter, vejiga urinaria o uretra). Una o varias de estas piedras urinarias, o cálculos, se pueden presentar al mismo tiempo alojadas en el riñón o en el uréter, siendo acumulaciones similares a las piedras que se forman a partir de sales minerales.

Son múltiples los factores que se ven implicados en esta enfermedad, destacando aspectos raciales, geográficos, epidemiológicos y hereditarios de las poblaciones estudiadas. Sus principales factores de riesgo son la hipercalcemia<sup>55</sup>, la hiperuricosuria<sup>56</sup>, el volumen urinario bajo, los hábitos alimentarios y el sexo, además de factores genéticos, sociales y climáticos. El aspecto económico de la enfermedad también es considerable, debido a la recurrencia de infecciones urinarias, a la necesidad de extracción quirúrgica y en el peor de los casos, a la progresión hacia una insuficiencia renal crónica.

Por su parte, factores ambientales y nutricionales incluyen deshidratación, alta ingesta de sal, una dieta rica en proteínas animales y calcio, cuando la ingesta de oxalato es restringida. El impacto de la dureza del agua en la formación de cálculos urinarios sigue siendo confusa, a pesar de una débil correlación entre la dureza del agua y la excreción de calcio urinario, magnesio y citrato.

---

<sup>55</sup> Excreción urinaria de calcio superior a 4 [mg/kg/día], dada una dieta normal en calcio, proteínas y sodio.

<sup>56</sup> Excreción urinaria de ácido úrico superior a 750 [mg/24hr].

Mientras varios estudios demuestran la nula existencia de alguna relación entre la dureza del agua y la incidencia de la formación de cálculos, algunos estudios sugieren que, en el enfoque preventivo de la nefrolitiasis (formación de cálculos renales) de calcio, la ingesta de agua blanda entre comidas es preferible al agua dura, ya que se asocia con un menor riesgo de recurrencia de los cálculos de calcio [55] [56]. Además, otro estudio realizado en Perú [57], concluye que la morbilidad<sup>57</sup> por litiasis de riñón y uréter son mayores en lugares donde el agua de consumo es dura, sin embargo, el estudio tiene la deficiencia de no considerar la ingesta de calcio y magnesio por fuentes diferentes al agua.

Por el contrario, estudios prospectivos recientes han demostrado que un alto consumo de calcio disminuye el riesgo de desarrollar cálculos renales. Este efecto protector, ha sido atribuido a la menor excreción de oxalato en la orina, ya que altos niveles de calcio consumidos favorecen la formación de oxalato de calcio insoluble en la pared interna del intestino que luego es eliminado en las heces.

Respecto al magnesio, se desconocen relaciones entre su presencia y la génesis de la urolitiasis.

### **C. Otras enfermedades:**

Diversos estudios han relacionado inversamente la dureza con algunas enfermedades, entre las que se destacan la anencefalia<sup>58</sup> y varios tipos de cáncer, pero que sin embargo la significancia de estos resultados es incierta. Además, un estudio realizado en India [55], recoge antecedentes de varias enfermedades que podrían estar asociadas a la dureza del agua potable, los cuales se destacan: la asociación estadística negativa con cáncer gástrico, efecto protector en mortalidad cerebrovascular, posible incidencia positiva en diabetes y densidad ósea, prevención de eclampsia y parto prematuro, y finalmente disminuir el estreñimiento.

Sin embargo, la significancia de estos resultados es incierta y se ha sugerido que las correlaciones pueden reflejar patrones de enfermedad que pueden ser explicados de mejor manera por factores sociales, climáticos y ambientales, más que por la dureza del agua.

Además cabe mencionar que la OMS, a través de la última actualización de su guía de recomendaciones [16], separa los componentes del agua considerados como potencialmente riesgosos para la salud humana según su concentración típica en las aguas para consumo humano:

- 1) Componentes mayores en el agua: Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), Fluoruro (F), Magnesio (Mg) y Sodio (Na).
- 2) Componentes menores en el agua: Antimonio (Sb), Aluminio (Al), Arsénico (As), Bario (Ba), Berilio (Be), Boro (B), Cadmio (Cd), Cesio (Cs), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu),

---

<sup>57</sup> Cantidad de personas que enferman en un lugar y un período de tiempo determinados en relación con el total de la población.

<sup>58</sup> Bebé que nace con un cerebro subdesarrollado y cráneo incompleto.

Estroncio (Sr), Hierro (Fe), Litio (Li), Manganeseo (Mn), Mercurio (Hg), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Plata (Ag), Plomo (Pb), Rubidio (Rb), Selenio (Se) y Uranio (U).

De estos componentes, en ningún caso se menciona al calcio o a la molécula de Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), como potencialmente riesgoso para la salud. Además, respecto a la dureza [16] en particular, no establece un valor de referencia debido a problemas para la salud, dados los niveles en que se encuentra en el agua de consumo humano. Sin embargo, señala como observación adicional, que puede afectar la aceptabilidad del agua de consumo humano, por lo que a continuación se presentan los efectos más comunes al respecto.

### 2.3.7 Efectos asociados al uso de las aguas duras

La precipitación de las sales que componen la dureza, se observa generalmente cuando el agua es calentada, aunque también se da en agua fría, generando una incrustación dura y difícil de remover, conocida comúnmente como sarro. Si bien los efectos indeseables relacionados a incrustaciones de sarro se deben a aguas muy duras, las aguas muy blandas también pueden generar inconvenientes, razón por la cual los efectos de ambas se desarrollan a continuación:

- 1) Aguas duras [34], que en términos macro, sus efectos se suelen presentar en:
  - **Procesos:** todo proceso que utilice este tipo de agua genera, en menor o mayor medida, incrustaciones. Estas aumentan en frecuencia e importancia cuando el agua es sometida a grandes temperaturas y presiones, cambios de sección transversal, pequeños espacios y orificios por donde pase el agua, que fomentan la incrustación, dentro de circuitos cerrados.
  - **Lavado (jabones y detergentes):** Cuando se lava con jabón empleando aguas naturales (relativamente altas en minerales), se forma un precipitado debido a la presencia de calcio, magnesio y hierro. Los iones de calcio de esta agua dura se unen con los iones del jabón disuelto, para formar sales insolubles, este proceso gasta el jabón y produce un sólido grumoso indeseable que permanece en la ropa. En consecuencia, es conveniente eliminar los iones calcio del agua, para usarse en lavanderías.
  - **Calentadores de agua:** Cuando el agua dura es usada en calentadores de agua se presenta una acción indeseable similar, el dióxido de carbono se desprende a altas temperaturas, y produce un depósito de sales de calcio o magnesio en el interior del calentador. Esto puede obstruir los tubos y también reducir la conductividad térmica. Estas incrustaciones suelen observarse muy a menudo en los hervidores de agua. Para el caso de los hervidores eléctricos, la incrustación sigue la forma de la resistencia en el fondo de este, en cambio, para el caso de hervidores convencionales, que utilizan fuego, la capa de sarro en el fondo es más bien homogénea en toda su área.
  - **Otros:** al no producir espuma, dificulta los procesos de limpieza en general, formando un residuo duro y grisáceo en las superficies, telas, piel y cabello cuando se realiza el lavado. Otra forma de evidenciar los problemas con el agua dura es la formación de sarro, o manchas de este, en todas las superficies en contacto con el líquido, como vasos de vidrio, cubiertos, salidas

de las llaves de las griferías, etc. Adicionalmente, en muchos casos la dureza le da un sabor indeseable (a veces metálico) al agua potable.

A nivel doméstico los más relevantes son las incrustaciones, que generan a la vez demoras en el tiempo de hervor, problemas en resistencias para calentar el agua en recipientes eléctricos y peor rendimiento energético en distintos aparatos.

Las incrustaciones, ya sean por precipitación al calentar las aguas, por su presencia en las paredes internas de las tuberías o simplemente por manchas en artefactos o elementos en contacto con estas aguas, es percibida directamente por los usuarios, como un registro de la calidad del agua.

Física y visualmente, se presenta como una capa blanca (principalmente delgada) en elementos sólidos, y en los líquidos, luego de la precipitación en forma de calcita, como una lámina fina tipo “isla flotante”, que le da un mal aspecto visual al agua potable [58].

En contexto industrial, si bien los efectos provienen de la misma fuente, la implicancia en costo puede ser muy relevante; por lo que generalmente las empresas que ocupan aguas duras a temperaturas altas invierten en procesos de purificación para contrarrestar estas adversidades generadas por su dureza. Su incidencia se da en cualquier empresa en que intervenga un proceso industrial que incorpore el agua a alta temperatura, afectando calderas, cañería y artefactos en general, pero también en campos como el agrícola donde se dañan aspersores, maquinaria de regadío e incluso disminuyendo la efectividad de herbicidas por sus efectos químicos [39].

## 2) Aguas blandas:

Mientras, por un lado, el agua muy dura suele ser considerada de sabor desagradable según sus consumidores, el agua muy blanda como, por ejemplo, el agua destilada o el agua de lluvia, también reporta un sabor desagradable, que es expresado como del tipo jabonoso. Por esta razón, es esencial un mínimo contenido de minerales, de los cuales las sales de calcio y magnesio son las más importantes, para que el agua tenga un sabor agradable y refrescante para el consumidor, por lo que controlar sus concentraciones resulta fundamental.

Por otra parte, aguas blandas son más corrosivas, por lo que tanto en su uso industrial como doméstico se llevan a cabo procesos en que se incorporan minerales, como lo mencionado en el párrafo anterior. Sumado a lo anterior se puede mencionar la calcificación de las aguas tratadas mediante osmosis inversa, y también tratamientos de disminución de corrosión y estabilización de aguas naturalmente blandas.

Por el contrario, aguas blandas bien controladas, presentan algunas ventajas como el ahorro de productos de limpieza y detergentes, ahorros energéticos importantes, mejora en el rendimiento de electrodomésticos, reducción de manchas de cal en vajillas, cubiertos y sanitarios, y mejoras en la eficiencia de sistemas de tuberías y griferías, entre otras.

### 2.3.8 Normativas internacionales

Si bien en Chile no se encuentra normada la dureza, y de los principales elementos que la componen solo el magnesio es controlado, a modo de comparación, se realiza un catastro de los límites normativos en algunos países y organizaciones del mundo, tanto del calcio y del magnesio, como de la dureza.

Para ello, se cruza información de las distintas normativas de agua potable de los países, disponibles de manera pública, y dos estudios principales al respecto;

- “Armonización de los estándares de agua potable en las Américas” [59] realizado por la Organización de Estados Americanos (OEA).
- “Normas Internacionales de Calidad de Agua de Bebida” [60] realizado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) en compañía de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Con esta información, se realiza la Tabla 2.16, comparativa entre distintas normativas de calidad de agua potable, donde se destaca en “negrita” aquellos países limítrofes con Chile.

Tabla 2.16: Concentraciones máximas permisibles de dureza (como CaCO<sub>3</sub>), Calcio y Magnesio, según distintas normativas.

Grupo	País	Dureza [mg/l]	Calcio [mg/l]	Magnesio [mg/l]	Nombre Norma	Año
OCDE	Chile	-	-	125	NCh409/1	2005
	Canadá	500	-	-	Guidelines	2004
	Estados Unidos	-	-	-	EPA 816-F	2003
	México	500	-	-	NOM-127-SSA1	2000
AMÉRICA DEL SUR	<b>Argentina</b>	<b>400</b>	-	-	CÓDIGO ALIMENTARIO	1994
	<b>Bolivia</b>	<b>500</b>	<b>200</b>	<b>150</b>	IBNORCA NB512	1997
	Brasil	500	-	-	PORTA-RIA 36-GM	1990
	Colombia	160	60	36	DEC 475/98	1998
	Ecuador	500	-	-	IEOS	1992
	Paraguay	400	100	50	LEY N° 1614	2000
	<b>Perú</b>	<b>300</b>	-	-	DIGE-S.A. (propuesta)	1999
	Uruguay	500	-	-	DTO. 27335	1996
	Venezuela	500	-	-	NORM 187 & 138	1998
CENTRO AMÉRICA	Costa Rica	400	100	50	DTO. 25991-S	1997
	El Salvador	400	75	50	NSO130701	1997
	Guatemala	500	150	100	NGO29001	1998
	Honduras	400	100	50	ACUERDO N° 084	1995
	Nicaragua	400	100	50	CAPRE	1994
	Panamá	-	-	-	RESOLUCIÓN N° 579	1999
CARIBE	Cuba	400	-	-	NC93-02	1997
	República Dominicana	500	200	150	NOR-DOM	1980
OMS		-	-	-	VALORES GUÍAS	2017
UNIÓN EUROPEA		-	100	50	CD 80/778/EEC	1995

### 2.3.9 La dureza en Chile

Como la dureza de las aguas potables no está incorporada en la normativa de calidad del AP chilena, no existen controles periódicos de las concentraciones de dureza a lo largo del territorio chileno, salvo catastros particulares de las empresas sanitarias o de la SISS.

Debido a lo anterior, se utilizan los resultados y catastros realizados por Marco Neira en su memoria de título [38], en la que se estima la dureza en el 79,5% de las comunas de Chile a la fecha del estudio (2006), usando información de magnesio contenida en los controles del agua potable de la SISS entre 2003-2004, información de calcio y magnesio a nivel comunal, de la memoria de Juan D'Etigny [61], de 1983, e información de varios años recopilada en diferentes estaciones de calidad de agua de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) recopiladas en sistemas de AP rural.

Así, en la *Tabla 2.17* se presentan los resultados más importantes del estudio de Marco Neira, cuyo detalle de mínimos y máximos regionales de dureza, así como de las concentraciones de calcio y magnesio, se adjuntan en el ANEXO D; “Detalle catastro de dureza, Memoria M. Neira”.

Tabla 2.17: Promedio de dureza total en cada una de las regiones de Chile, según estudio de Marco Neira, y su clasificación.

Región <sup>59</sup>	Comunas C/Info.	Promedio de Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	Clasificación	
			Propuesta M. Neira	OMS
XV y I	6/10	362,47	Dura	Muy Dura
II	5/9	341,11	Dura	Muy Dura
III	6/9	630,23	Muy dura	Muy Dura
IV	12/15	494,41	Dura	Muy Dura
V	28/38	266,01	Moderadamente dura	Muy Dura
RM	49/52	393,73	Dura	Muy Dura
VI	21/33	195,66	Moderadamente dura	Muy Dura
VII	22/30	92,47	Blanda	Moderadamente dura
XVI y VIII	49/52	55,23	Blanda	Blanda
IX	28/31	37,40	Blanda	Blanda
XIV y X	34/42	44,52	Blanda	Blanda
XI	9/10	46,90	Blanda	Blanda
XII	3/11	89,90	Blanda	Moderadamente dura

Se observa, y tal como se menciona anteriormente, que en el norte de Chile predominan las aguas duras, y que, en promedio la mayoría de las aguas potables de todas las comunas, son clasificadas como aguas muy duras, según escalas internacionales de dureza admisible, como lo es la de la OMS. De hecho, tanto el promedio simple (de los promedios, equivalente a 235 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>]), como el promedio ponderado (considerando las comunas con información, equivalente a 193 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>]), a nivel país, cataloga al agua como “Muy dura” según la clasificación de la OMS, al superar los 180 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>]. Además, y para ilustrar de mejor manera la

<sup>59</sup> Algunas regiones están agrupadas debido a que, a la fecha de realización del catastro, aún no existían las nuevas divisiones regionales actuales a la fecha del presente trabajo de título.

distribución de norte a sur de la dureza en Chile, se presenta el *Gráfico 2.10* que, muestra de los promedios, e incorpora los máximos y mínimos regionales a lo largo del país.

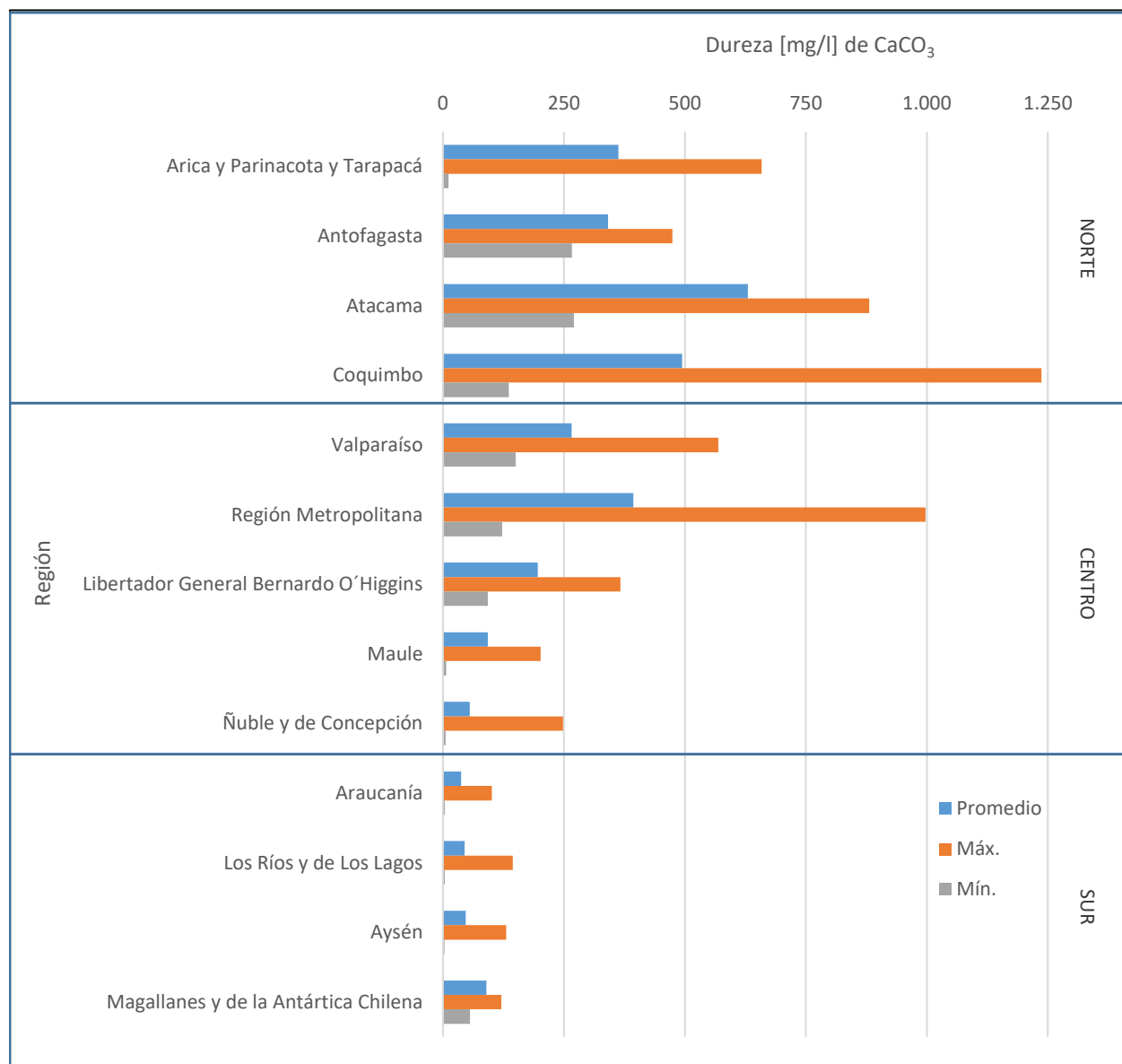


Gráfico 2.10: Distribución de la dureza del AP en Chile, tanto en promedio como los máximos y mínimos, según estudio M. Neira.

Dentro de las conclusiones del estudio se señala que el elemento, presente en el agua, que actúa como principal responsable de los altos niveles de dureza de las aguas chilenas, es el calcio.

Además, en el estudio se realiza una categorización de la dureza por comuna, con el fin de ilustrar de manera más simple la distribución geográfica de ella a lo largo del país. De esta forma, en la *Figura 2.3*, se muestra dicha distribución comunal de dureza, diferenciando los rangos según la categorización presentada en el mismo estudio, referente a la *Tabla 2.10*.

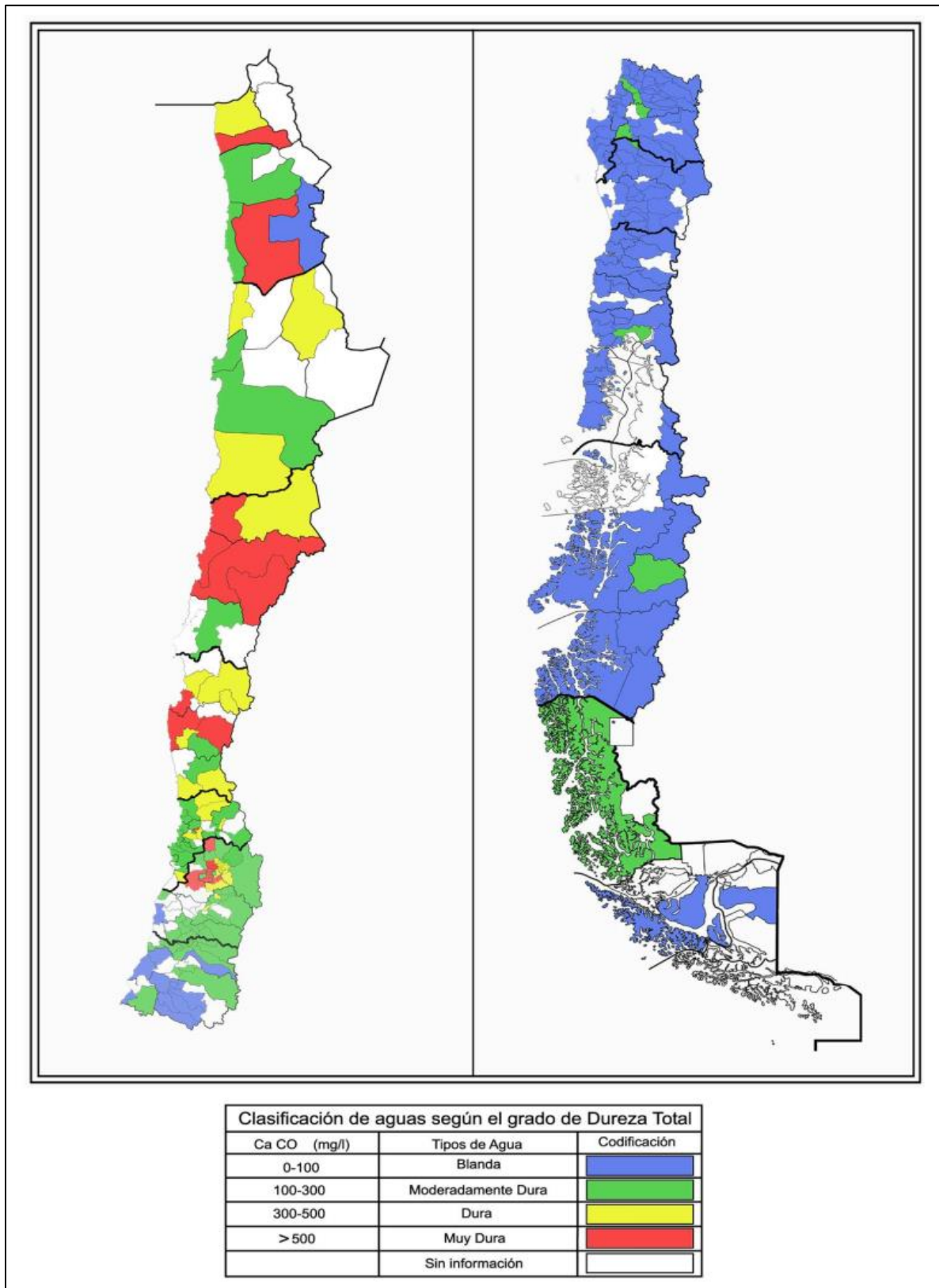


Figura 2.3: Niveles de dureza del agua potable a nivel comunal en Chile. Fuente: Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de Caso: Chile. Marco Antonio Neira Gutiérrez, 2006.

Otro de los resultados importantes del estudio, es el catastro de durezas extremas, clasificadas como muy duras (según escala de Marco Neira), al ser mayores a 500 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], en las localidades que se presentan a continuación en la *Tabla 2.18*.

Tabla 2.18: Comunas de Chile, que poseen un agua potable con dureza mayor a 500 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>].

Región	Provincia	Nombre de la Comuna	Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]
I	Iquique	Pozo Almonte	521,62
XV	Arica	Camarones	658,66
II	Copiapó	Copiapó	880,93
II	Copiapó	Caldera	785,44
II	Copiapó	Tierra Amarilla	683,45
II	Chañaral	Chañaral	774,71
IV	Elqui	Coquimbo	662,96
IV	Choapa	Canela	628,07
IV	Limarí	Ovalle	682,51
IV	Limarí	Monte Patria	1236,85
V	Quillota	Calera	569,27
RM	Santiago	Cerrillos	695,21
RM	Santiago	Maipú	708,51
RM	Santiago	Pudahuel	572,64
RM	Chacabuco	Tiltil	754,05
RM	Maipo	Buín	503,93
RM	Melipilla	Melipilla	941,20
RM	Talagante	Talagante	743,92
RM	Talagante	Isla de Maipo	723,63
RM	Talagante	Padre Hurtado	836,48
RM	Talagante	Peñaflor	996,99

De la tabla, se desprende que la Región Metropolitana es la que tiene mayores casos de durezas extremas.

Finalmente, se presenta el resultado del catastro [62] realizado por la empresa de tratamiento de agua Vigaflo S.A.<sup>60</sup> el año 2016, según mediciones a sus clientes en cada comuna de la RM, y donde se observa la gran variabilidad geográfica de su concentración para la región, demostrada ilustrativamente en la *Figura 2.4*. También se observa la gran cantidad de comunas con durezas sobre los 500 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], en sus aguas potables.

<sup>60</sup> Empresa chilena, de la industria del tratamiento de agua con enfoque en desalinización y re-uso de agua.

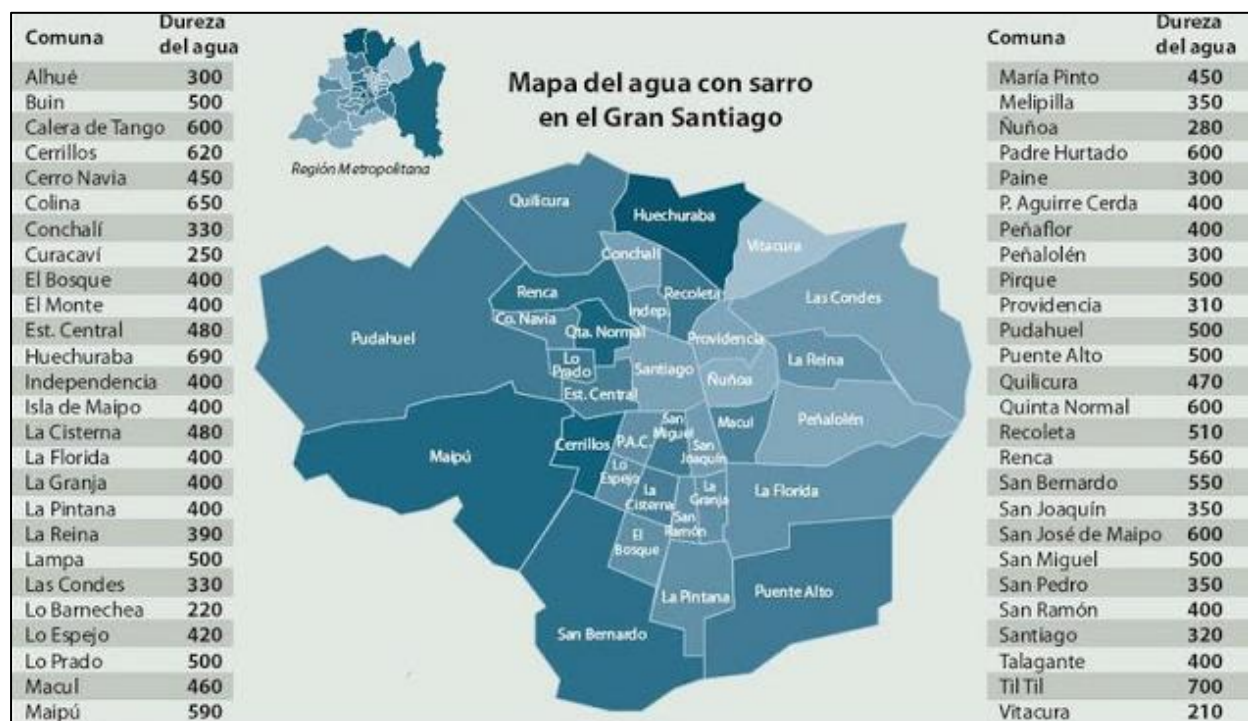


Figura 2.4: Distribución de la dureza del agua potable, de las comunas de la región metropolitana de Santiago de Chile. Fuente: Vigaflow S.A.; <https://vigafloWSa.blogspot.com/2016/08/mapa-del-agua-con-sarro-en-la-dureza.html?view=timeslide>.

La figura anterior deja en evidencia que la variación de la dureza geográficamente, entre un lugar y otro no tan alejado, es tan grande que las características del agua en comunas de una misma ciudad pueden ser muy diferentes.

## 2.4 SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE AGUAS DEL ALTIPLANO

Según los estudios de actualización de los Planes de Desarrollo (PD) vigentes (facilitados por Aguas del Altiplano S.A.), realizados durante el año 2013<sup>61</sup>, para el período 2012-2027<sup>62</sup>, se obtienen las características más importantes para entender el proceso de producción de Agua Potable, tanto para la ciudad de Arica, como para Iquique.

En dichos PDs, se establece un catastro y diagnóstico de la infraestructura actual, junto con las inversiones necesarias para garantizar la prestación de los servicios sanitarios dentro del área de concesión, para los próximos 15 años.

<sup>61</sup> Bajo el supuesto de que la infraestructura, tanto de distribución como de producción de AP, no ha sufrido modificaciones importantes a la fecha. En cuanto a valores de caudales, se han utilizado actualizaciones más recientes.

<sup>62</sup> Cabe mencionar que dichos planes son presentados cada cinco años a la SISS, por parte de todas las empresas sanitarias del país, donde cuyo objetivo es definir las obras requeridas para satisfacer, en forma eficiente, la demanda del territorio operacional abastecido por la sanitaria en particular, para los próximos 15 años, y establecer la proyección de inversiones que garanticen la prestación de servicios sanitarios dentro del área de concesión.

Cabe mencionar que la empresa Aguas del Altiplano posee cuatro tipos de concesión en las regiones de Arica y Parinacota (XV Región) y Tarapacá (I Región); (1) Producción y (2) Distribución de Agua Potable, y (3) Recolección y (4) Disposición de Agua Servida.

Así, en el ANEXO E; “Sistemas de producción de ADA”, se describen a grandes rasgos los dos sistemas más relevantes para la presente memoria, de cada región, que son la Producción y Distribución de Agua Potable, y así centrar el análisis en el Sistema Iquique-Alto Hospicio presentado a continuación.

#### 2.4.1 Sistema Iquique – Alto Hospicio

Dada la simpleza, parecido geográfico, y potencial de análisis, el sistema elegido para analizar la factibilidad y costos de habilitación de las distintas opciones de tratamiento en el Norte de Chile, es el sistema de Producción y Distribución de AP Iquique – Alto Hospicio, que si bien, incluye los sistemas de Pozo Almonte, La Huayca, y el suministro a la Cárcel de Alto Hospicio y a la Planta Soledad, como lo muestra la *Figura 11.2*, los mayores consumos provienen de Iquique y Alto Hospicio, centrando así el análisis en el tratamiento del agua para esas 2 comunas (según división político-administrativa), por lo que se realiza una simplificación, que se detalla más adelante.

Para localizar geográficamente a la Región de Tarapacá en donde se encuentran las localidades de estudio, dentro del continente y país, se presenta la *Figura 2.5* y la *Figura 2.6* respectivamente.



Figura 2.5: Localización geográfica de la Región de Tarapacá, respecto al territorio continental chileno. Fuente: Google Maps.

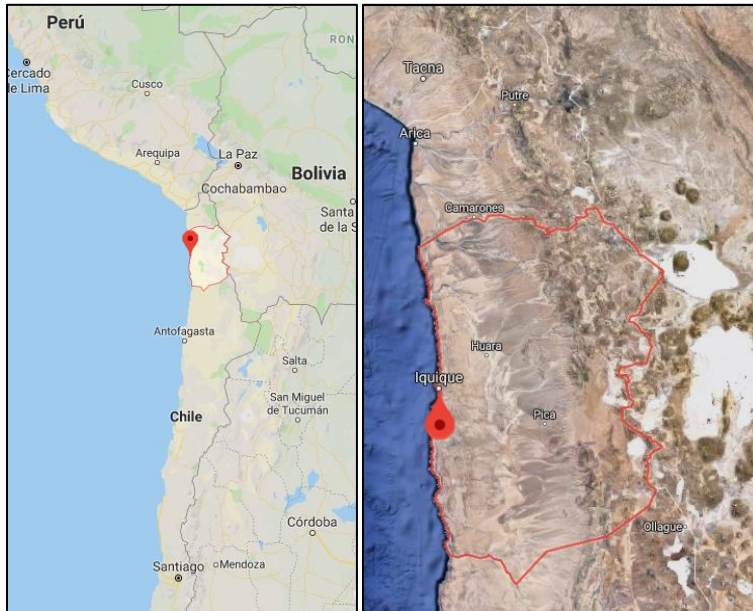


Figura 2.6: De izquierda a derecha, vista simplificada y vista satelital ampliada, de la Región de Tarapacá (delimitada en rojo), destacando puntualmente el sector donde se encuentra Iquique y Alto Hospicio. Fuente: Google Maps.

Además, en la Figura 2.7, se muestran las áreas que abarcan cada una de las localidades de estudio, sus tamaños relativos, y se aprecia la altura en la que se emplaza la localidad de Alto Hospicio, con respecto a Iquique.



Figura 2.7: Vista satelital de las áreas que abarcan las localidades del Iquique y Alto Hospicio. Fuente: Google Maps.

La ciudad de Iquique es un balneario marítimo ubicado en el sector poniente central de la Región de Tarapacá, un gran centro pesquero y el mayor puerto mundial exportador de harina de pescado, así como un gran centro comercial debido a la Zona Franca, además de ser el principal centro de servicio de la industria de la minería del cobre y no metálica presente en la región.

Iquique es la capital de la comuna y provincia del mismo nombre. Presenta un clima desértico costero normal, con nublados abundantes de franca uniformidad anual; poca oscilación térmica, camanchacas<sup>63</sup> matinales y un régimen de precipitaciones extremadamente bajas. Se encuentra a 1.843 [km] al norte de Santiago, y a 302 [km] al sur de Arica (distancias por la Ruta 5).

La localidad se encuentra dividida en dos zonas claramente diferenciadas: en el borde costero, se encuentra la ciudad de Iquique propiamente tal e inmediatamente al interior y a 339 [msnm], la comuna de Alto Hospicio, que ha experimentado un desarrollo importante y sostenido, en los últimos años.

La ciudad misma se encuentra en una terraza costera limitada por el mar en el poniente, y hacia el oriente, por una verdadera pared montañosa de fuerte pendiente que constituye el borde poniente de la meseta superior en la que se ubica Alto Hospicio.

Iquique posee una superficie de 2.242 [km<sup>2</sup>] y una población, para el 2017 de 191.468 habitantes, acogiendo al 57,92% de la población total de la región [63].

El sistema de producción de Agua Potable de Iquique, se abastece exclusivamente de captaciones subterráneas, las que se ubican en la Pampa del Tamarugal, a más de 60 [km] al oriente de la ciudad, denominados Canchones y El Carmelo, y cuyas aguas convergen en la localidad de Alto Hospicio, en el estanque del mismo nombre, luego de desplazarse a través de grandes conducciones (detalles en el apartado 11.5.2 del ANEXO E; “Sistemas de producción de ADA”).

Por otra parte, Alto Hospicio, también en la Provincia de Iquique, está ubicada en los altos cercanos de Iquique. En cuanto a su clima, recoge las mismas características de clima desértico costero normal de Iquique, dada su cercanía, ya que está a tan solo 10 [km] de distancia. Al estar emplazada en una meseta superior, existe un cambio brusco de altura en poca distancia, y por consiguiente una gran pendiente.

El auge económico que experimentó Iquique en la década de los años 90, hizo que Alto Hospicio explotara demográficamente, pasando de un pequeño grupo de casas y poblaciones que no superaban los 2000 habitantes a comienzos de los noventa, a una ciudad con 108.375 habitantes y una superficie de 593 [km<sup>2</sup>], para 2017, llegando en conjunto con Iquique a poseer el 90,71% de la población regional, con 299.843 habitantes [63].

---

<sup>63</sup> Camanchaca: f. Bol., Chile y Perú. Niebla espesa y baja.

En cuanto a sus fuentes de AP, estas provienen de las captaciones subterráneas ubicadas en el sector de Canchones, al sur de El Carmelo, tal y como muestra la *Imagen 2.2*.



Imagen 2.2: Fotografía satelital de la posición geográfica de los sectores de producción del sistema de AP de Iquique. Fuente: Google Maps.

Considerando que el análisis de producción de AP se realiza con datos de hasta diciembre de 2017, se incorpora al proceso de producción la PTAP Santa Rosa, previa (y en las cercanías) del recinto de estanques Santa Rosa, la cual fue inaugurada a principios de noviembre de 2013 [64]. Esta planta, mediante un tratamiento físico-químico, se encarga de la remoción de arsénico mediante un proceso de floculación, que implica oxidación, coagulación y filtración del agua, transformándose así en la planta de abatimiento de arsénico más grande de Chile.

La elección de este sistema por sobre el sistema de Arica, radica en que este último posee muchas mezclas de agua de producción, y una dispersión en las fuentes para distribución, por lo que se necesitaría una batería más compleja de puntos de aplicación de los tratamientos para mitigar o eliminar los efectos del sarro en la totalidad del agua potable distribuida en Arica. En cambio, el sistema de producción Iquique – Alto Hospicio (IQQ-AH en adelante), posee 2 líneas de producción, siendo El Carmelo y Canchones, generando una estructura de producción más sencilla.

A continuación, en la *Figura 2.8*, se muestra el sistema simplificado IQQ-AH que se analizará, y al cual se evaluarán los distintos tratamientos para eliminar los efectos de las aguas duras en los sistemas de AP. Cabe mencionar que se eliminaron algunos sistemas de almacenamiento y producción, para centrar la atención en el tratamiento del AP distribuida solo en las localidades de Iquique y Alto Hospicio.

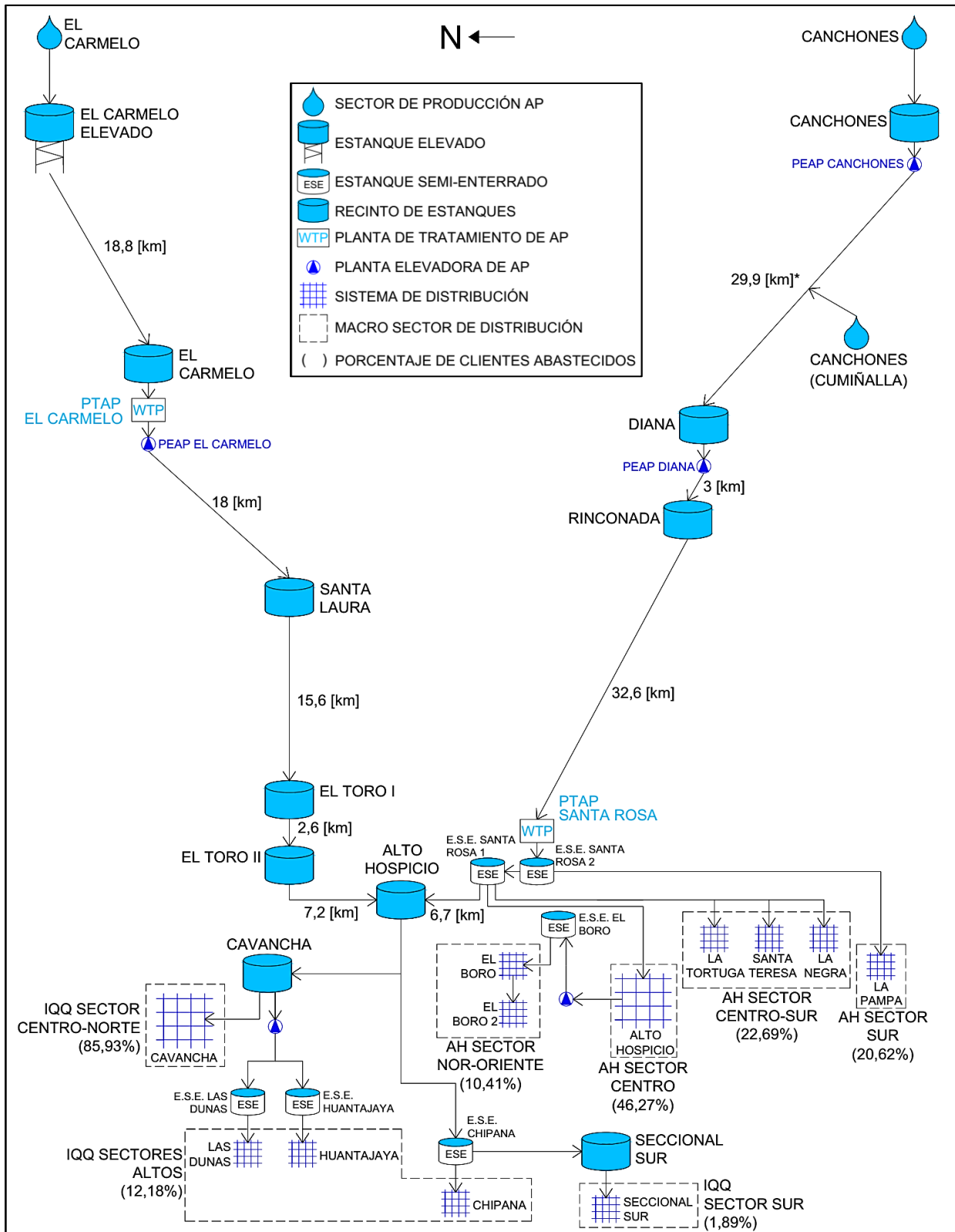


Figura 2.8: Diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de IQQ-AH. Porcentaje de clientes abastecidos, según los clientes totales de la localidad referida (información facilitada por ADA, actualizada al 06/07/18). \*Posee otra conducción en paralelo, de 29,7 [km] (distancias presentadas son proporcionales al valor). Fuente: Elaboración Propia.

Cabe señalar que, dado el gran porcentaje de clientes del Sector Centro Norte de Iquique, se realiza una parcelación de los clientes que abastecen dicho sector, según los clientes de los 3 sectores de presión presentes en la información facilitada por Aguas del Altiplano. Así, en la *Tabla 2.19*, se presentan los porcentajes de clientes a utilizar para cada uno de los sectores del Sector Centro-Norte de Iquique.

Tabla 2.19: Porcentajes de clientes abastecidos de AP por sector, en Iquique, luego de realizar la parcelación correspondiente del Sector Centro-Norte.

Sector de Iquique	Porcentaje de Clientes
Centro-Norte S1	36,72%
Centro-Norte S2	26,24%
Centro-Norte S3	22,97%
Alto	12,18%
Sur	1,89%
Total	100,00%

## 2.4.2 Población Abastecida

Con el fin de estimar la cantidad de población que se vería beneficiada por la implementación de los distintos sistemas abatidores de los efectos de aguas duras, se realizan proyecciones del índice habitacional (cantidad de habitantes por viviendas-clientes), para cada una de las localidades, según los datos históricos de habitantes y viviendas [65] [66], y bajo el supuesto de que estas tienden a estabilizarse en el tiempo. Dichas proyecciones se presentan en el ANEXO F; “Proyecciones de Población” tanto para Iquique como para Alto Hospicio.

Además, se realiza la proyección de clientes para cada localidad, según los clientes conocidos para el año 0 y sus respectivas tasas de crecimiento anual de clientes, siendo 2,96% para Iquique y 2,12% para Alto Hospicio. Cabe mencionar que dichas tasas se asumen constantes en tiempo, tal y como se utilizaron en los PD respectivos.

Así, y asumiendo una cobertura de AP del 100% de los habitantes (dentro del territorio operacional) para ambas localidades, se obtiene la población estimada que se vería beneficiada por el tratamiento, para cada una de las localidades según los clientes proyectados, mostrada de manera resumida por la *Tabla 2.20*.

Tabla 2.20: Resumen de las Proyecciones de Clientes y Población abastecida, para cada una de las localidades, y también para la totalidad del sistema IQQ-AH en estudio. Para más detalles, ver ANEXO F; “Proyecciones de Población”.

Año	Año de estudio	Clientes Abastecidos			Población Abastecida		
		Iquique	Alto Hospicio	Sistema IQQ-AH	Iquique	Alto Hospicio	Sistema IQQ-AH
		[cliente]	[cliente]	[cliente]	[hab]	[hab]	[hab]
0	2017	60.748	28.775	89.523	173.637	93.992	267.629
1	2018	62.546	29.385	91.931	176.593	95.650	272.243
5	2022	70.287	31.957	102.244	185.904	102.595	288.499
10	2027	81.323	35.491	116.815	203.308	112.026	315.334
15	2032	94.093	39.416	133.509	235.233	122.369	357.601

### 3 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

En este capítulo se presenta la problemática que ataca el estudio, relacionando la dureza de las aguas potables a la percepción de sus clientes en Chile. Además, se caracterizan las aguas potables del norte de Chile, obteniendo finalmente una dureza objetivo para los usuarios de AP.

#### 3.1 RELACIÓN ENTRE EL ISN Y LA CONCENTRACIÓN DE DUREZA EN CHILE

Asumiendo que no existe variación de la concentración de dureza de las fuentes en el tiempo, se utiliza la información referente a durezas de las comunas de Chile (para el año 2006, [38]).

Así, y bajo los antecedentes generales presentados, se procede a comparar la satisfacción de los clientes con respecto al servicio de AP (mediante el ISN ponderado, según los datos del *Gráfico 2.5*, obtenidos de la Encuesta de Percepción de clientes, realizada por la SISS), y la concentración de dureza del AP (ponderando los datos del *Gráfico 2.10*), a lo largo del país, tal como muestra el *Gráfico 3.1*, el cual agrupa los resultados por región administrativa y empresa sanitaria, según la región natural respectiva (ver ANEXO A; “División territorial”).

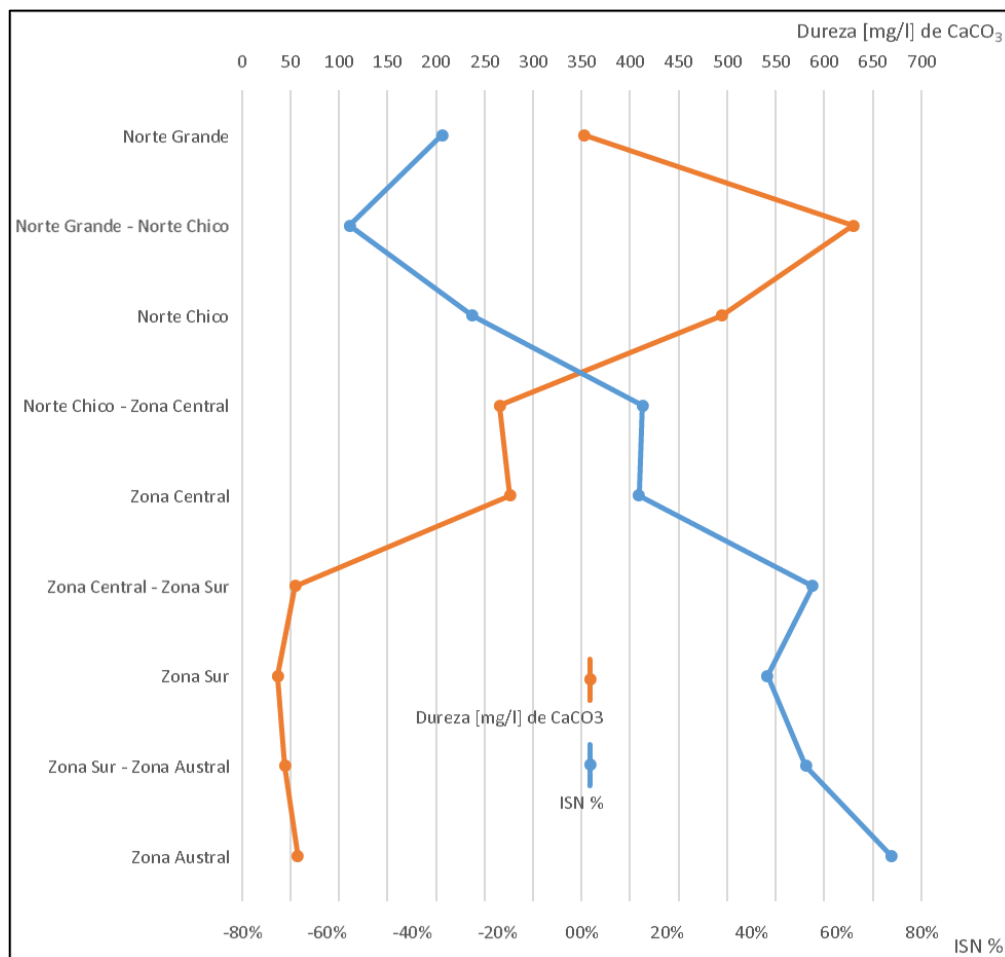


Gráfico 3.1: Distribución de la concentración de dureza y del índice de satisfacción neta ponderado, para cada una de las regiones naturales. Fuente: Elaboración Propia.

Del gráfico anterior, se desprende que la dureza del agua se relaciona de forma inversa con la satisfacción de los clientes respecto al servicio de AP entregado por la empresa sanitaria.

De la misma forma, en el *Gráfico 3.2*, se muestra que el ISN del servicio de AP de cada uno de los aspectos evaluados (específicos, presentados en el apartado 2.1.1), tienen una relación proporcional, tanto con el ISN ponderado como con la concentración de dureza. Se añade que la relación de estos últimos es similar, en forma, a la evaluación a lo largo del país del peor aspecto a nivel nacional, como lo es el precio (ANEXO G; “ISN%, Dureza y Precio”).

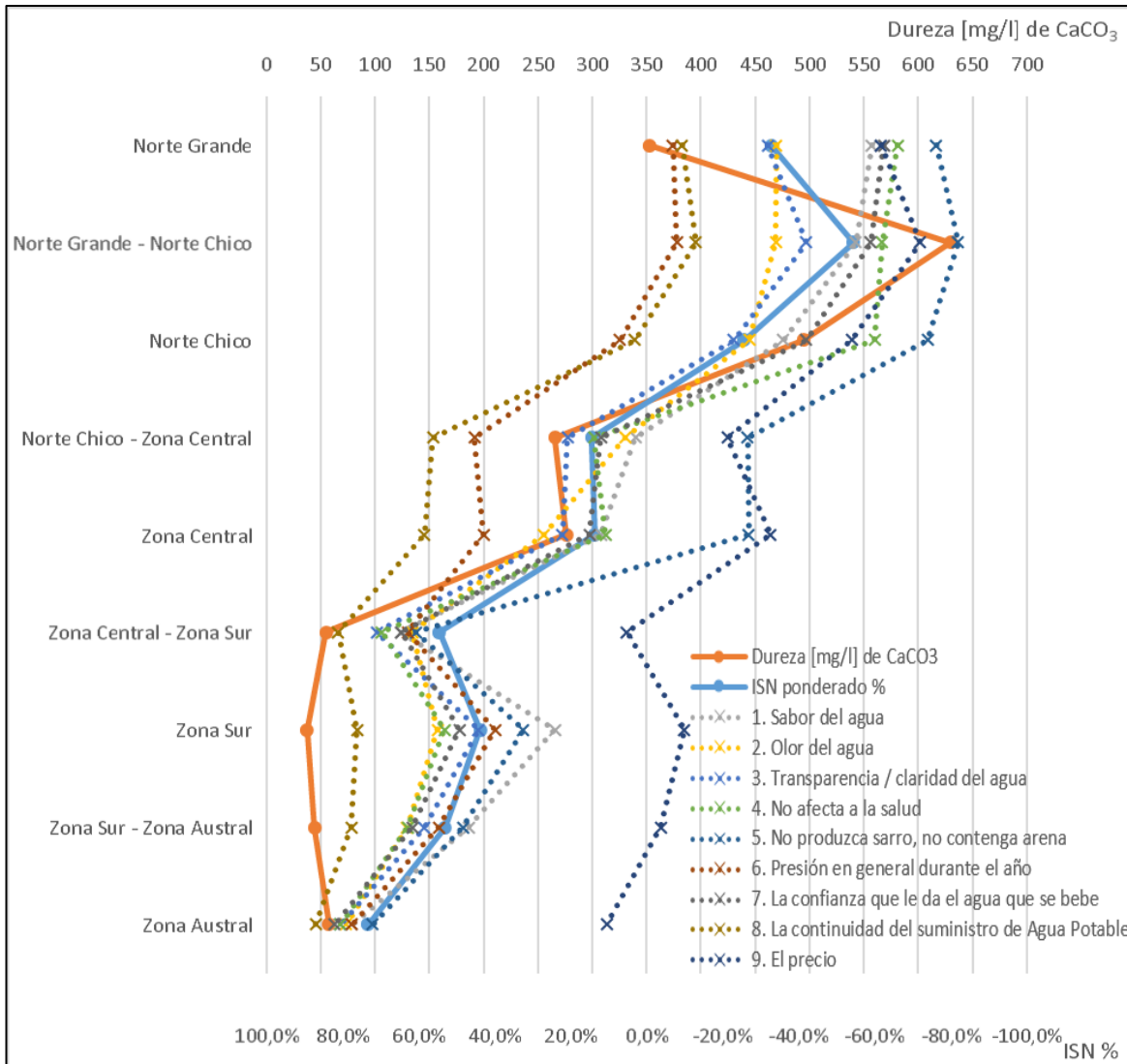


Gráfico 3.2: Distribución de la concentración de dureza y del índice de satisfacción neta; ponderado y de cada uno de los aspectos específicos, para cada una de las regiones naturales. El eje del ISN% se encuentra “girado”. Fuente: Elaboración Propia.

Cabe mencionar, que aun cuando no existe un catastro completo, y controlado periódicamente, de la dureza en Chile, si se puede verificar su presencia en los efectos indeseables de ella, principalmente en artefactos, y las opiniones de los usuarios, afectando directamente su percepción de calidad de AP, lo cual se verifica en los gráficos presentados.

## **3.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA POTABLE DE AGUAS DEL ALTIPLANO**

A continuación, se realiza una caracterización de las aguas tanto crudas para producción, como tratadas para su distribución, en las regiones XV y I de Chile, en donde ADA presta los servicios sanitarios. Luego, la caracterización se centra en la calidad del agua en el Sistema IQQ-AH.

### **3.2.1 Tipo de Fuente**

Tal y como se menciona en el apartado 2.4, en el Norte macro natural (salvo al norte de la región de Valparaíso) el AP tiene origen principalmente subterráneo, dada la escasez relativa del recurso superficial (salvo la región de Antofagasta, con mayoría de agua de mar desalinizada).

Como el presente análisis considera, en una primera instancia, el tratamiento del agua distribuida por Aguas del Altiplano, tanto para la XV como para la I región, las fuentes de agua a caracterizar son en su gran mayoría de origen subterráneo, captadas a grandes profundidades (en general mayores a 100 [m]) según el acuífero respectivo, y de gran potencial para disolver componentes minerales de los suelos e incorporarlos a su flujo.

Para la Región de Arica y Parinacota, los recursos hídricos son escasos, dadas sus características de extrema aridez, donde las fuentes de agua provienen de captaciones subterráneas de las cuencas de los ríos San José y Lluta, cuya profundidad varía entre los 90 y los 130 [m]. La Región de Tarapacá, por su parte, posee la mayoría de sus fuentes de agua en dos grandes sectores de la Pampa del Tamarugal, El Carmelo por el norte y Canchones un poco más al sur, también mediante captaciones subterráneas, pero más profundas, que incluso alcanzan los 200 [m].

Según la clasificación de fuentes de agua potable, presente en el Anexo A de la norma chilena NCh777/1.Of2008 *Agua potable – Fuentes de abastecimiento y obras de captación – Parte 1: Captación de aguas superficiales* [67], el agua captada para ser tratada por Aguas del Altiplano se clasifica en su mayoría del “TIPO III, señalando que para este tipo de fuente, los procesos convencionales de tratamiento de AP no son suficientes, y que se deben complementar o aplicar, adicional o independientemente, procesos especiales”, lo cual es cumplido por la sanitaria, al igual que lo requerido por la NCh777/2.Of2000 [68], referente al cumplimiento de los requisitos generales para obras de captación de aguas subterráneas de su tipo particular.

Las principales bases de datos utilizadas para la caracterización son datos técnicos de cada sistema sanitario (principalmente de operación y control de calidad en PTAP), facilitados por ADA, y datos del Sistema de Facturación de la SISS (SIFAC), la que es periódicamente actualizada por el organismo regulador (según la información remitida por las empresas sanitarias).

### **3.2.2 Calidad y dureza del agua, XV y I Región**

En la *Tabla 3.1* y en la *Tabla 3.2*, se muestran las concentraciones de los elementos controlados por la NCh409/1.Of2005, presentes en las aguas crudas de las fuentes de producción de las regiones

XV y I, respectivamente<sup>64</sup>. También se presentan la calidad final anual promedio<sup>65</sup> luego de los distintos tratamientos realizados en las PTAP, para posterior distribución de AP [69].

Tabla 3.1: Concentraciones de parámetros de importancia en el AC, de las fuentes de la XV Región. Para el AC, en color rojo las concentraciones promedio que sobrepasan el límite normativo, y para el agua tratada, en color verde, su cumplimiento.

Elementos	Promedio de Calidad del Agua Cruda	Límite Normativo	Promedio de Calidad del Agua Tratada
	XV Región	NCh409/1.Of2005	XV Región
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Sulfatos	503,28	500	213
Cloruros	677,20	400	309
Hierro	0,37	0,3	0,0
Manganeso	0,34	0,1	0,0
Nitratos	47,1	50	32
SDT	2405,79	1500	1354
Arsénico	0,04	0,01	0,01

Tabla 3.2: Concentraciones de parámetros de importancia en el AC, de las fuentes de la I Región. Para el AC, en color rojo las concentraciones promedio que sobrepasan el límite normativo, y para el agua tratada, en color verde, su cumplimiento.

Elementos	Promedio de Calidad del Agua Cruda	Límite Normativo	Promedio de Calidad del Agua Tratada
	I Región	NCh409/1.Of2005	I Región
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Sulfatos	500,00	500	396
Cloruros	181,83	400	173
Hierro	0,1	0,3	0,1
Manganeso	0,50	0,1	0,0
Nitratos	10,2	50	8
SDT	1260,62	1500	1131
Arsénico	0,04	0,01	0,01

En cuanto a la dureza de la XV Región, ADA no ha realizado un catastro en esta región, pero en la *Tabla 3.3* se muestra un extracto del catastro realizado para la memoria de Marco Neira [38].

Tabla 3.3: Catastro de concentración de dureza total, en donde se utilizaron datos de magnesio entre 2003 y 2004, desde la SISS. Algunos datos de magnesio, calcio y dureza total, desde la Dirección de Obras Hidráulicas y de la Dirección General de Aguas.

Región	Comunas con Información	Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]		
		Máximo	Promedio	Mínimo
XV y I	6/10	658,66	362,47	11,53

Para el caso de la dureza en la I Región, durante el año 2018, ADA realiza un catastro de ella, tanto total como cálcica, en distintos puntos de la red de distribución, en las localidades de Iquique, La Huayca, Matilla y Pisagua, resumido en la *Tabla 3.4* y la *Tabla 3.5*.

<sup>64</sup> Antecedentes de calidad AC, obtenidos del informe “Actualización de los Planes de Desarrollo – Arica” (Detalles en el ANEXO H; “Calidad del Agua Cruda – XV Región”), y de “Actualización de los Planes de Desarrollo – Iquique” (detalles en el ANEXO I; “Calidad del Agua Cruda – I Región”).

<sup>65</sup> Antecedentes obtenidos de los Resultados de Calidad del AP del año 2017, publicados por la SISS.

Tabla 3.4: Concentraciones de dureza total máxima, promedio y mínima, para cada una de las 4 localidades de la I Región, mediante los datos de los 121 puntos de muestra.

Localidad	N° puntos	Tipo de Punto	Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]		
			Máxima	Promedio	Mínima
Iquique	9	Estanque	544,5	168,6	52,0
	37	Red AP	596,5	501,8	440,4
La Huayca	10	Estanque	360,3	305,7	268,2
	18	Red AP	360,3	297,9	168,2
Matilla	8	Estanque	176,2	163,8	152,1
	24	Red AP	380,3	188,6	132,1
Pisagua	5	Estanque	293,3	225,9	7,1
	10	Red AP	298,3	232,0	7,4

Tabla 3.5: Concentraciones de dureza cálcica máxima, promedio y mínima, para cada una de las 4 localidades de la I Región, mediante los datos de los 82 puntos de muestra.

Localidad	N° puntos	Tipo de Punto	Dureza Cálcica [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]		
			Máxima	Promedio	Mínima
Iquique	7	Estanque	52,0	46,0	40,0
	-	Red AP	-	-	-
La Huayca	10	Estanque	286,2	220,5	122,1
	18	Red AP	276,3	201,6	112,1
Matilla	8	Estanque	220,2	160,0	138,1
	24	Red AP	330,3	157,3	122,1
Pisagua	5	Estanque	236,2	178,1	5,8
	10	Red AP	234,2	171,1	5,7

Además, a continuación, en el *Gráfico 3.3* y el *Gráfico 3.4*, se muestra la distribución de la dureza, total y cálcica respectivamente, por localidad y tipo de punto de muestra.

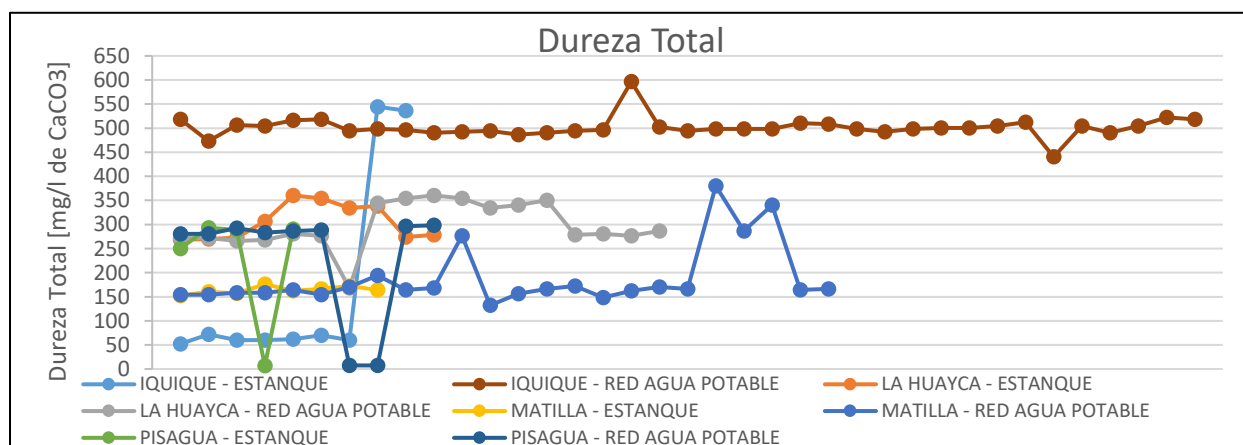


Gráfico 3.3: Concentraciones de dureza total, diferenciando las 4 localidades y sus tipos de puntos de muestreo.

Cabe mencionar que, si bien el promedio de dureza total, para las 121 muestras de este tipo, en distintos lugares de las localidades señaladas, es de 312,3 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], este no es muy representativo de la dureza de la zona, dada la variabilidad de esta mostrada por el *Gráfico 3.3*, el que además muestra que las concentraciones de dureza total en la red de AP de Iquique, son

mayores a las encontradas en la misma localidad, pero en estanques. Así, se observan variaciones incluso en la misma localidad y tipo de muestra, como el caso de la red de AP de Matilla.

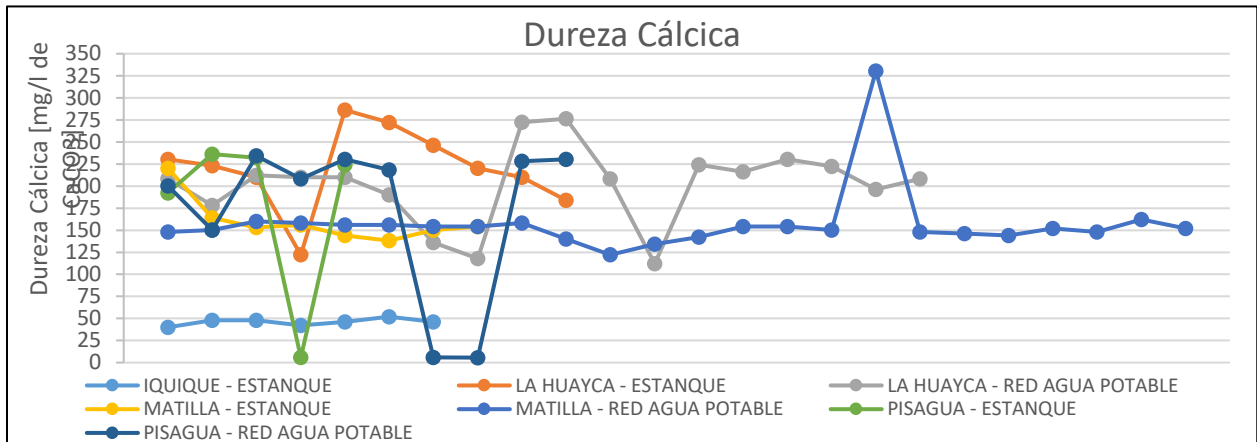


Gráfico 3.4: Concentraciones de dureza cálcica, diferenciando las 4 localidades y sus tipos de puntos de muestreo.

A modo de comparación, el Gráfico 3.5 y el Gráfico 3.6 presentan la dureza total y cálcica.

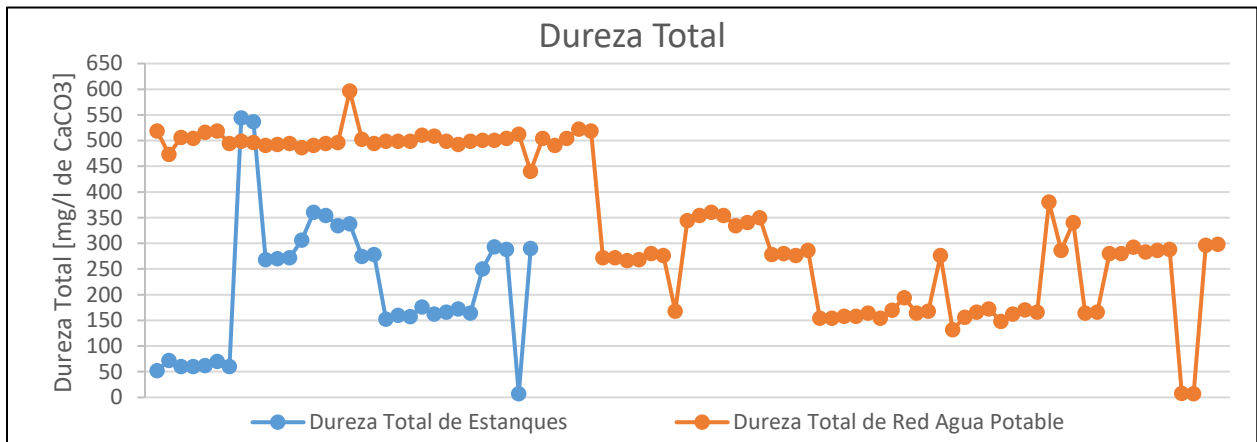


Gráfico 3.5: Concentraciones de dureza total, diferenciando solo el tipo de punto de muestreo.

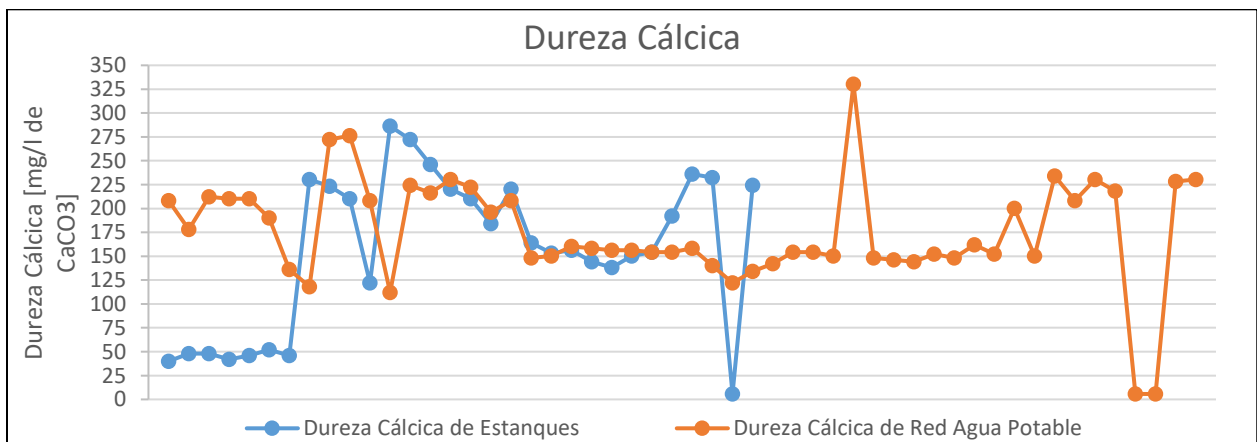


Gráfico 3.6: Concentraciones de dureza cálcica, diferenciando solo el tipo de punto de muestreo.

Si bien, la dureza total se mueve dentro de un amplio rango de valores, aproximadamente entre los 600 y los 5 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], las mayores concentraciones se encuentran en la red de agua potable de Iquique, tal y como muestran el *Gráfico 3.3* y el *Gráfico 3.5*. Por otra parte, para el caso de la dureza cálcica, el rango es más acotado, entre los 331 y los 5 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] aproximadamente, mostrando una variabilidad muy parecida entre los datos de estanques y de puntos de la red de AP, según el *Gráfico 3.4* y el *Gráfico 3.6*.

Cabe destacar que la distancia relativa entre cada localidad estudiada condiciona la fuente de donde proviene el agua, tal y como se muestra en el ANEXO J; “Localidades catastradas con dureza”, determinando así los resultados obtenidos.

### 3.2.3 Calidad y dureza del agua, IQQ-AH

Así, verificando el cumplimiento de la normativa de calidad de agua potable en la XV y I Región, se muestra en la *Tabla 3.6* y en la *Tabla 3.7*, el detalle de la calidad del agua, tanto cruda como tratada (respectivamente), de IQQ-AH. Cabe recordar, que este sistema, cuenta con dos subsistemas; El Carmelo y Canchones, donde el primero abastece a las localidades de Pozo Almonte e Iquique, y el segundo a Iquique y Alto Hospicio.

Tabla 3.6: Concentraciones promedio de parámetros de importancia en el AC de los sondeos fuentes de los sistemas que abastecen a IQQ-AH. En color rojo, las concentraciones promedio que sobrepasan el límite normativo, mostrado en la última columna.

Elementos	Sistema				Límite Normativo
	Pozo Almonte - Iquique	Iquique - Alto Hospicio			
	El Carmelo	Canchones	Cumiñalla	Canchones + Cumiñalla	NCh409/1.Of2005
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Sulfatos	495,00	324	416	351	500
Cloruros	205,00	104	17	108	400
Hierro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,3
Manganeso	0,05	0,47	0,76	0,56	0,1
Nitratos	0,00	0,00	0,00	0,00	50
SDT	1203,00	867	1033	916	1500
Arsénico	0,01	0,061	0,031	0,05	0,01

Tabla 3.7: Concentraciones promedio de parámetros de importancia en el agua tratada, para los sistemas que abastecen a IQQ-AH. Se destaca en color verde, las concentraciones promedio que cumplen el estándar normativo, mostrado en la última columna.

Elementos	Promedio de Calidad de Agua Tratada		Límite Normativo
	Iquique	Alto Hospicio	NCh409/1.Of2005
	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
Sulfatos	457	365	500
Cloruros	186	111	400
Hierro	0,1	0,2	0,3
Manganeso	0,0	0,0	0,1
Nitratos	8	11	50
SDT	1234	936	1500
Arsénico	0,01	0,01	0,01

Ahora bien, para el caso de la dureza, solo se tienen datos de puntos dentro de Iquique, luego del catastro realizado por ADA mencionado anteriormente, y que se presenta en la *Tabla 3.8* de forma resumida, y en el ANEXO K; “Catastro de dureza en Iquique” detalladamente, para la dureza Cálctica y Total.

Tabla 3.8: Concentraciones de dureza total y cálcica máxima, promedio y mínima, para la localidad de Iquique de la I Región. Catastro de dureza cálcica solo en los estanques de distribución.

Tipo de Dureza	N° puntos	Tipo de Punto	Dureza [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]		
			Máximo	Promedio	Mínimo
Total	9	Estanque	544,5	168,6	52,0
	37	Red AP	596,5	501,8	440,4
Cálctica	7	Estanque	52,0	46,0	40,0

### 3.3 DUREZA OBJETIVO

Según lo mostrado en el punto anterior, es posible argumentar que, a menor concentración de dureza, se tiene un efecto positivo en la percepción de calidad del agua potable, por parte de los clientes, como lo muestra las líneas de tendencia presentadas en el *Gráfico 3.1*.

Así, y en la búsqueda de obtener una concentración de dureza objetivo, que maximice la percepción positiva del servicio de AP por parte del cliente, se sugiere una dureza objetivo cercana al promedio de dureza presentada entre las Regiones Naturales; Zona Central-Sur, Zona Central y Zona Austral, correspondientes a las Regiones Administrativas; VIII, IX, XIV, X, XI y XII. De esta forma, se obtiene un promedio de 54,8 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>]. Sin embargo, dicho promedio es engañoso, al existir durezas máximas de 247,9, y mínimas de 3,4 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], para dichas regiones, tal como muestra el ANEXO D; “Detalle catastro de dureza, Memoria M. Neira”.

Por otra parte, y tal como se hizo mención, la OMS no recomienda durezas menores a 100 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], por su riesgo a causar problemas ligados a la corrosión, por lo que elegir dicha dureza como objetivo, podría tener efectos adversos. Por otra parte, el organismo internacional estima que durezas mayores a 200 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] comienzan a generar incrustaciones importantes en diversos sistemas e instalaciones que utilicen dichas aguas [16].

Dado lo anterior, se fija una **dureza objetivo de 150 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>]** (equivalente al promedio de ambas durezas mencionadas), a alcanzar por los tratamientos en estudio, para el Sistema IQQ-AH. Así, se podría esperar un cambio importante en el ISN ponderado con respecto al servicio de AP<sup>66</sup>, cercano al 55% de la macro región natural sur, o al menos alcanzando el 18% de la macro región natural centro. Cabe mencionar que dicho supuesto no puede ser una hipótesis, debido a que el ISN contempla 9 aspectos (presentados en el *Gráfico 2.7*), de los cuales se estaría asumiendo que la eliminación de las incrustaciones afectaría positivamente a la mayoría de ellos.

<sup>66</sup> Dado que ninguna de las regiones de Chile posee un promedio de dureza de 150 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], donde el más cercano corresponde a la IV Región, con 195,66, el planteado posible aumento del ISN es solo una estimación.

## **4 PROCESOS ABATIDORES DE LOS EFECTOS DE LA DUREZA**

---

Como se menciona en capítulos anteriores, las aguas naturales y tratadas tienen una amplia gama de minerales, desde niveles muy bajos en el agua de lluvia y el agua blanda de forma natural o por tratamiento, hasta niveles más altos en las aguas naturalmente duras. Por otra parte, las aguas embotelladas y envasadas pueden ser naturalmente mineralizadas o naturalmente blandas o desmineralizadas.

Por esto, el consumo de minerales provenientes del agua de consumo humano y del agua de cocción varía ampliamente, dependiendo de la ubicación, el tratamiento y la fuente de agua.

El aporte de minerales del agua potable para nutrición mineral debería considerarse cuando se proponen cambios en el abastecimiento o cuando se explotan nuevas fuentes para el agua potable, tales como agua de mar o agua salobre. Actualmente no hay datos suficientes para sugerir concentraciones de minerales mínimas o máximas, y por ello la bibliografía no propone valores guías. Sin embargo, los distintos tratamientos que eliminan la dureza del agua, pueden controlar estas concentraciones y fijar una dureza esperada.

Entonces, conocida la calidad del agua del sistema en estudio, se hace necesario conocer las posibles formas en que se pueden abatir los efectos de dureza, para posteriormente elegir alguno de los procesos según sus características más eficientes, tanto técnicas como económicas.

### **4.1 TIPOS DE PROCESOS**

Cabe mencionar que la OMS, en uno de sus estudios [13], menciona que el tratamiento centralizado de ablandamiento del agua, por lo general involucra la cal (ablandamiento del óxido de calcio) o la soda (carbonato de sodio) y se practica comúnmente en varios países del mundo. Estos productos químicos aumentan la precipitación del carbonato de calcio y magnesio, reduciendo la dureza de calcio del agua tratada, y además son balanceadas para minimizar la precipitación posterior de la cal, por lo que se contemplan procesos de estabilización según sea necesario, para controlar la corrosividad.

Si bien, en Chile (a la fecha del presente estudio) ninguna empresa sanitaria trata el agua que distribuye para abatir los efectos de las aguas duras, la mayoría de las industrias que utilizan calderas en sus procesos productivos cuentan con un proceso de remoción de dureza llamado Intercambio Iónico, siendo así el más utilizado en el país (también utilizados por otras industrias, como inmobiliarias y constructoras).

De hecho, existen distintas tecnologías para remover la dureza del agua y/o para abatir los efectos de ella, donde las más importantes se presentan a continuación, clasificándolos en Tratamientos Básicos, Avanzados (ambos Convencionales) y No Convencionales.

#### 4.1.1 Tratamientos Básicos

##### 1) Precipitación con Cal [70]:

También conocido por sus variaciones como método Cal-Soda o Cal-Carbonato, el cual consiste en utilizar Cal (hidróxido de calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), o en algunos casos Soda (carbonato de sodio,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), para precipitar la dureza temporal o permanente, respectivamente, como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) o hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ).

Es considerado como el método más simple y económico para ser aplicado a gran escala (por ejemplo, de forma centralizada en un sistema de producción/distribución de AP). Dado que, en la mayoría de los casos, la dureza cálcica es la principal responsable de los inconvenientes, el uso de la Cal es el más frecuente para su precipitación en este proceso, el cual se explica a continuación.

El proceso consiste en aplicar una dosis de Cal al agua con lo cual los bicarbonatos de calcio y magnesio se transforman en carbonatos insolubles, los que precipitan y pueden ser removidos por sedimentación con la ayuda de coagulantes. La reacción química ocurrida se detalla en el ANEXO L; “Reacciones Químicas de Procesos Ablandadores”.

Cabe mencionar, que las reacciones químicas del proceso requieren que el pH sea alto, por lo que el efluente que se obtiene de este proceso tiene un pH entre 10 y 11. Por esta razón, una vez removido el carbonato de calcio, generalmente por sedimentación floculenta, el agua debe ser estabilizada de manera de volver a una condición aproximadamente neutra. Como el agua ha perdido casi todo el dióxido de carbono, generalmente se neutraliza por recarbonatación, es decir por la incorporación de dióxido de carbono que se hace burbujear para facilitar la transferencia (detalles en ANEXO L; “Reacciones Químicas de Procesos Ablandadores”).

El equipo principal, lo conforma un estanque con una capacidad diseñada de acuerdo a las necesidades y que requiere un tiempo de retención (debido a la velocidad de las reacciones [71]).

Este proceso presenta ventajas cuando el caudal a tratar es grande y la calidad del agua efluente mantiene concentraciones uniformes de los compuestos a remover, ya que la dosificación de los agentes ablandadores debe ser precisa.

Un inconveniente del tratamiento por adición de cal es la producción de grandes cantidades de lodos, alcanzando éstos hasta 2,5 veces la cantidad de Cal empleada inicialmente. Esto ocurre por la combinación de la Cal con el calcio y magnesio contenidos en el agua, lo que aumenta la formación de lodos en la etapa de coagulación posterior al ablandamiento. La disposición de estos lodos se realiza generalmente en depósitos o canchas de secado, para lo cual se deshidratan y así reducir su volumen.

Cabe mencionar, que estos lodos también pueden ser recuperados e incorporados nuevamente al proceso de elaboración de la Cal, mediante el proceso de recarbonatación de los lodos y posterior calcinación. De hecho, es posible recuperar de 1,2 a 1,3 toneladas de Cal, por cada tonelada de Cal usada para el ablandamiento, produciendo un excedente, que puede ser vendido [71].

## 2) Intercambio Iónico:

Esta tecnología consiste, como su nombre lo indica, en intercambiar los iones causantes de la dureza, por otros. Así, se basa en el uso de resinas sintéticas de intercambio catiónico, donde se intercambian los iones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por iones de sodio,  $\text{Na}^+$ , de modo que se genera bicarbonato de sodio, mientras los iones calcio y magnesio quedan retenidos en la resina.

Luego, y a medida que se usa la resina, esta va perdiendo los iones de sodio y se va saturando con los iones de calcio y magnesio, hasta el punto en que se torna ineficiente, momento en que se debe realizar una regeneración de ella, aplicando a la resina una solución concentrada de Cloruro de Sodio (reacciones químicas en ANEXO L; “Reacciones Químicas de Procesos Ablandadores”).

Como se menciona anteriormente, esta tecnología de ablandamiento del agua es la más utilizada en Chile a pequeña escala, especialmente a nivel industrial, donde se utiliza para reducir la acumulación de incrustaciones en sistemas de vapor o calentamiento de agua.

El posible equipo empleado para una aplicación centralizada de este proceso, es un estanque con las resinas de intercambio en su interior, y donde cuyo tamaño dependerá de la demanda, la cual definirá su correcto diseño.

Por otra parte, este método de ablandamiento de agua presenta ventajas para caudales bajos o medianos por la simpleza del control y operación de éste. Así, operando en este rango de caudales y para una dureza variable del afluente, se produce un agua de calidad prácticamente constante, y con niveles de remoción mayores a los obtenidos por el método de Precipitación con Cal.

En cuanto a los inconvenientes de este método se basan en que, para mantener un funcionamiento eficiente, se debe trabajar con agua con bajos contenidos de sólidos suspendidos para evitar la colmatación del lecho, ya que esto aumenta la presión del circuito y las pérdidas de la capacidad de intercambio de las resinas. Este método además requiere paradas continuas del equipo para la regeneración del medio y se debe tener un control permanente de la calidad de agua afluente y efluente del sistema.

Otro problema de este método, es la posibilidad de una excesiva concentración de sodio en el agua ablandada<sup>67</sup>, lo que puede generar problemas para personas hipertensas sal dependientes o llegar al nivel máximo recomendado por la OMS, por condiciones organolépticas, de 200 [mg/l] [26], además de eliminar el cloro residual libre<sup>68</sup>, exigido por la normativa chilena de calidad [72].

---

<sup>67</sup> Incrementa el índice salino, ya que reemplaza cada átomo de calcio o magnesio intercambiado, con pesos atómicos de 40,08 y 24,305, respectivamente, por 2 átomos de sodio con peso atómico 23 cada uno.

<sup>68</sup> Compuesto que mantiene la seguridad bacteriológica de las aguas e impide que se contaminen y aporten infecciones a sus consumidores, por lo que al eliminar este compuesto las posibilidades de contaminación aumentan.

#### 4.1.2 Tratamientos Avanzados

##### 1) Evaporación-Condensación [71]:

Este proceso consiste simplemente en el calentamiento de agua hasta lograr su ebullición, para posteriormente recolectar lo condensado, con la desventaja de que se deben agregar los minerales esenciales perdidos en el proceso,

El calentamiento del agua reduce la solubilidad del dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, reduciendo su concentración por pérdida hacia la atmósfera o acumulación en forma de burbujas. Esto causa que los bicarbonatos de calcio y magnesio presentes en el agua, precipiten en forma de carbonatos, dejando el agua con una dureza reducida. La reacción química involucrada se presenta en ANEXO L; “Reacciones Químicas de Procesos Ablandadores”.

La precipitación de estos carbonatos, es uno de los efectos más conocidos de la dureza, el cual causa daño principalmente en sistemas de agua caliente, y a la vez, constituye una posible alternativa tecnológica para remover la dureza. Si bien a pequeña escala es muy fácil hervir el agua, dejarla decantar y, de esta manera, eliminar parte de su dureza, a una mayor escala los altos costos energéticos, más los costos adicionales asociados a la remoción de la dureza precipitada, hacen que esta tecnología no sea de frecuente aplicación. Además, como este proceso sólo permite remover la dureza temporal asociada a los bicarbonatos, aguas donde la dureza sea en su mayoría permanente, no tendrán una reducción.

Cabe mencionar, que el proceso de recolección de agua lluvia o de neblina, también se basan en el mismo principio, pero difieren en la concentración de elementos, al incorporar aquellos presentes en la atmósfera. Por esta razón, este tipo de proceso es utilizado mayormente a nivel comunitario o domiciliario.

El principal inconveniente de este tratamiento, es que al agua queda muy desmineralizada, quedando demasiado blanda, y para el caso del agua lluvia, ligeramente ácida. Por esta razón, se suelen agregar piedras de carbonato de calcio, a los estanques de almacenamiento de agua previamente tratada, con el fin de contribuir al aporte de calcio y la prevención de la corrosión.

##### 2) Procesos de Membranas [71]:

Estos tipos de procesos consisten en hacer pasar el agua por una membrana permeable de tamaño de poro determinado, mediante la utilización de una fuerza o una combinación de fuerzas impulsoras. Esto se logra, generalmente, aumentando la presión con un sistema de bombeo, dejando así un agua filtrada con menor concentración mineral y, concentrando en el lado de la membrana, una porción determinada de las impurezas como un concentrado.

Cabe mencionar que tanto las características del agua, como el tamaño del poro de la membrana permeable, determinan la cantidad y calidad de impurezas removidas. Así, los procesos de membrana más comunes son los que muestran la *Tabla 4.1*, los que se diferencian principalmente por el tamaño del poro de la membrana permeable.

Tabla 4.1: Características principales de los procesos de membrana más comunes de tratamiento de agua (PM = Peso Molecular en [gr/mol]. \*de arriba abajo los elementos retenidos que se van acumulando. \*\*retiene parcialmente las moléculas de bajo peso).

Proceso de Membrana	Poros [μm]	Elementos principales retenidos*	Aplicaciones Comunes
Microfiltración	0,1 - 10	Bacterias, turbidez, macromoléculas, coloides.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esterilización en frío de productos farmacéuticos y alimentos líquidos.</li> <li>• Reducción de microorganismos del agua.</li> <li>• Pretratamiento para Nanofiltración y Osmosis Inversa.</li> </ul>
Ultrafiltración	0,01 - 0,1	Virus, macroproteínas, antibióticos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminación de sustancias orgánicas nocivas en la industria alimentaria y de bebidas.</li> <li>• Eliminación de trihalómeros del agua.</li> <li>• Tratamiento de aguas residuales y la industria textil.</li> </ul>
Nanofiltración	0,001 - 0,01	Gran parte de los iones divalentes, las moléculas orgánicas de PM > 200, y gran parte de las moléculas en general**.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ablandamiento de agua.</li> <li>• Eliminación de metales pesados y descontaminación de las aguas residuales.</li> <li>• Eliminación de nitratos y cloruros.</li> <li>• Eliminación de color.</li> <li>• Pretratamiento para Osmosis Inversa.</li> </ul>
Osmosis Inversa	<0,001	La mayor parte del contenido de sales, iones monovalentes, compuestos orgánicos de PM > 50.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desalación de agua de mar.</li> <li>• Tratamiento de agua cruda alta en minerales.</li> </ul>

Por sus características, los únicos procesos de membrana que eliminan los iones causantes de la dureza, son la Nanofiltración y la Osmosis Inversa, las cuales se describen a continuación.

- **Nanofiltración:** también llamada osmosis inversa a baja presión o desendurecimiento por membrana, posee un tamaño de poros típicamente entre 10 y 1 [nm], siendo las más comunes estas últimas (de aquí el término). Las membranas permiten débilmente el paso de iones monovalentes como el sodio y el potasio, pero rechazan una proporción alta de iones divalentes como el calcio y el magnesio, y de moléculas orgánicas de peso mayor a 200 [gr/mol].

El proceso combina características de ultrafiltración y osmosis inversa, pues su mecanismo de separación se basa tanto en diferencias de tamaños, propio de la Ultrafiltración, y en el modelo de disolución – difusión, tal como ocurre en Osmosis Inversa. La técnica opera con presiones

de trabajo a media – baja presión, normalmente del orden de los 0,5 a 1,5 [MPa] (1 [MPa] = 10 [bar] = 102 [mca]). Además, poseen una ligera carga superficial, por lo que su interacción juega un papel importante, y es un principio que sirve para separar iones de diferente valencia.

Ofrecen una alternativa de tratamiento singular, ya que eliminan contaminantes específicos de aguas con bajas concentraciones de Sólidos Disueltos Totales (SDT), entre los que se destacan la dureza total en un 80 a 95%, y los Iones monovalentes en un 70%.

- **Osmosis Inversa:** este proceso consiste en revertir el fenómeno de osmosis en una membrana semipermeable mediante la aplicación de altas presiones, superiores a la presión osmótica. En la mayoría de los casos, los poros de estas membranas tienen un tamaño menor a 1 [nm], aunque en casos particulares pueden llegar a 2 [nm]. Esta membrana rechaza los iones monovalentes y compuestos orgánicos de peso molecular mayores a 50 o 100 [gr/mol], permitiendo remover las impurezas disueltas del agua en un porcentaje alto, cercano al 95%.

La separación de elemento del agua en este proceso, se basa las diferencias de solubilidad y difusividad de los solutos en los materiales de las membranas (mecanismo de disolución-difusión). Así, las moléculas de agua pasan en el espacio intermolecular de la membrana, en la que no existen poros propiamente tal, aunque se define por simplicidad que éste es equivalente a un tamaño de menos de 1 [nm] [26]. Para ello, es necesaria una gran presión de trabajo, normalmente en el orden de los 5 a 8 [MPa], dependiendo de la aplicación.

La Osmosis Inversa es el proceso de membrana que remueve la mayor cantidad de elementos y compuestos del agua, destacando [16] al Calcio y Magnesio en un 94 a 98%, al Sodio en un 87 a 93%, a los Nitratos en un 60 a 75% y a los Iones de cloruro y fluoruro en un 87 a 93%.

La principal diferencia de este tratamiento, con la Nanofiltración, es la necesidad de un gran aumento de la presión de operación del sistema, debido a que las membranas son menos permeables, lo que se traduce en un aumento de los costos energéticos.

Las aguas tratadas mediante osmosis inversa resultan con un contenido tan bajo de minerales que pueden tener problemas de sabor o ser corrosivas, razón por lo que se deben remineralizar para alcanzar un adecuado equilibrio iónico. La remineralización se puede hacer mediante el agregado de cal y otros minerales y/o mediante la mezcla con parte de las aguas crudas. Además, las sales removidas del agua tratada se concentran en el denominado rechazo, el que puede equivaler a entre 20 y 50% del agua afluente, las que deben ser dispuestas como residuo.

Cabe mencionar que el correcto funcionamiento de las membranas semi-permeables utilizadas, dependen de algunos factores como el pH, la turbidez y la concentración de cloro. También, la eficiencia de los elementos de las membranas puede verse afectadas por la incrustación de componentes insolubles o por la retención de materiales coloidales suspendidos. Por lo anterior, se suele considerar en el diseño de estos procesos un pretratamiento para proteger la membrana de este tipo de fenómenos, con el objeto de facilitar la limpieza de las membranas [71].

Los principales beneficios de estos tipos de tratamiento son que trabajan con una amplia gama de caudales y cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua cruda. Además, son sistemas automáticos que remueven bacterias y casi todos los contaminantes iónicos, y presentan una alta eficiencia en la remoción de dureza.

Sus deficiencias, radican en la necesidad de los altos niveles de pretratamiento en algunos casos, el manejo de sus aguas de desecho y los altos costos de inversión inicial y operación.

### 3) Efecto del campo magnético [73]:

En los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas para el tratamiento de aguas duras, como el caso del denominado Tratamiento Magnético del Agua, el cual consiste en hacer pasar el agua dura por un campo magnético alto (del orden de 500 Gauss) con un caudal medio y controlado, del orden de algunos litros por minuto, luego de lo cual el agua adquiriría la propiedad de no producir incrustaciones, sin disminuir la concentración de dureza del agua.

Aun cuando este mecanismo de tratamiento no ha podido, hasta la fecha, ser explicado satisfactoriamente, existen ciertos criterios que tratan de explicar de modo cualitativo el proceso. Si bien los experimentos efectuados en torno a este fenómeno indican una clara dependencia de la intensidad del campo magnético aplicado y de la velocidad del fluido, existen dudas en el efecto del campo con respecto a la estructura del agua, surgiendo dos alternativas; 1) reforzamiento del poder de atracción de los iones diluidos y 2) actúa sobre las moléculas de agua rompiendo el fuerte encapsulamiento de los iones. En esta última, actuaría rompiendo directamente, en la solución, el enclaustramiento de las impurezas (iones), propiciando así que se liberen en la misma solución microcristales no ligados al recipiente (arenilla fina), los cuales más tarde precipitan.

Quizás, el efecto más interesante de la aplicación de campo magnético sobre aguas duras es la evidencia de la formación casi inmediata de microcristales que, dependiendo de las condiciones, se mantienen en suspensión y/o se van precipitando. El tipo de microcristales generados dependen principalmente de los constituyentes del agua dura y de los parámetros del tratamiento magnético.

Cabe mencionar, que la efectividad del tratamiento magnético radica en la prevención de las incrustaciones, no en la remoción de dureza. Esta prevención se originaría por el efecto del campo magnético sobre el agua que activa y polariza las moléculas de agua, produciendo una fuerte interacción con las especies iónicas presentes, más fuerte que las de estas especies con las superficies metálicas modificadas (superficies internas de tuberías de intercambiadores de calor, calderas, calefactores de agua, etc.), propiciando la formación en el seno del agua de cristales finos de carbonato de calcio con estructura de aragonita<sup>69</sup>. Éstos quedan en suspensión y pueden ser retirados con facilidad posteriormente por sedimentación (calefactores de agua) o retirados por

---

<sup>69</sup> Estructura cristalina del carbonato de calcio, que no posee poder incrustante y tiene un tamaño entre 30 a 50 veces más pequeño que la estructura cristalina incrustante, calcita.

purga (calderas de vapor) y su generación evita la formación de cristales de calcita (carbonato de calcio) sobre las superficies metálicas.

Se han reportado tanto experiencias positivas como negativas de la aplicación de esta técnica, pero no han sido del todo concluyentes, ya que las condiciones específicas en que se debe realizar el tratamiento magnético, dependen críticamente del campo aplicado. Por otro lado, se han descrito diversas aplicaciones novedosas del tratamiento magnético en múltiples áreas (como agricultura, medicina, veterinaria, etc.) indicando un futuro prometedor de esta técnica.

Una de las limitaciones de este tratamiento es que, al parecer, sólo es aplicable a caudales pequeños, centrándolas para el uso doméstico a escala local. Sin embargo, en un estudio realizado en el departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Chile [74] se concluyó que el acondicionamiento magnético del agua podría permitir ahorros en reactivos anti incrustantes, ahorro en costos de mantención y aumento de la vida útil de los sistemas de intercambio de calor.

#### **4.1.3 Tratamientos No Convencionales**

Tanto los tratamientos básicos como avanzados presentados, tienen características de utilización más bien convencional, y en su gran mayoría han sido profundamente estudiados, investigados y aplicados en diversas áreas del tratamiento de agua. Sin embargo, existen tratamientos ligados a la innovación tecnológica, que aún no han tenido la suficiente investigación y aplicación de manera masiva, por lo que a continuación se mencionan algunos de ellos, según las características presentadas por sus proveedores.

##### **1) Sistema Antical Electrónico, VULCAN [75]:**

Vulcan es un descalcificador electrónico de la empresa familiar alemana CWT (Christiani Wassertechnik), que genera la pérdida de la capacidad adherente del sarro, cambiando la estructura de los cristales de calcio, mediante impulsos electrónicos capacitivos (de alta frecuencia), sin cambiar la calidad de agua, ni utilizando sales ni químicos. Su fin es la protección permanente de las tuberías y aparatos ante calcificaciones y oxidaciones dañinas, con una vida útil de 30 a 40 años.

Sus aplicaciones abarcan sistemas residenciales, comerciales e industriales, con un rango para secciones tubulares de 10 a 500 [mm] de diámetro exterior. Su instalación es por fuera de la cañería de agua, tal y como se muestra en la *Imagen 4.1*, siendo así de fácil su instalación. Además, es compatible con todo tipo de material de tuberías, como hierro, cobre, plástico, acero inoxidable, PVC y otros.

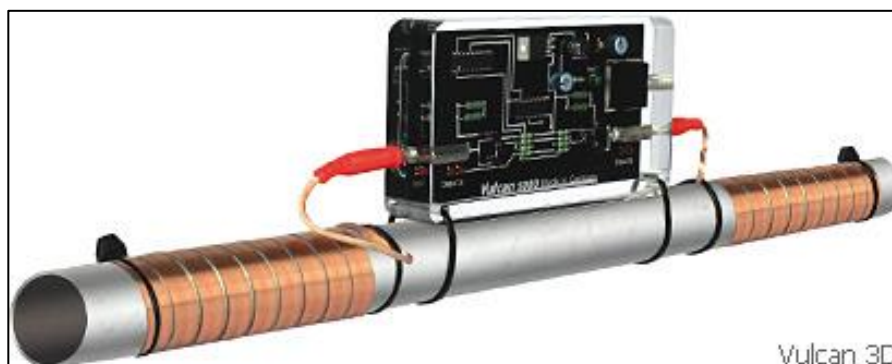


Imagen 4.1: Instalación de referencia del descalcificador Vulcan en una tubería. Fuente: <http://www.cwt-vulcan.es/technology.html>

Al no utilizar sales ni químicos para el proceso de descalcificación, Vulcan resulta ser una solución ecológica que no cambia los niveles de calidad del agua ni tampoco genera lodos o desechos. Además, junto con evitar el proceso de sedimentación de cal en tuberías y aparatos, el sistema Vulcan dice tener dos efectos positivos más;

- Limpiar los depósitos calcáreos existentes en los sistemas de tuberías, eliminándolos de forma gradual y cuidadosa.
- Crear una capa protectora de carbonato, del metal que sea la tubería, por ejemplo, cobre, hierro o zinc, protegiendo así las tuberías metálicas del óxido y la corrosión.

La desventaja de este sistema radica en que el efecto del cambio de la estructura de los cristales de calcio, que se logra alterando el equilibrio del dióxido de carbono presente en el agua, solo dura por 2 [km] de longitud de tubería y, además, luego de que el agua entra en contacto con el aire, por ejemplo, al abrir la llave, ésta busca el equilibrio químico inicial del dióxido de carbono, llegando así a la misma situación inicial luego de algunos minutos (lo que dependerá de características propias del agua tratada). Dado que, a grandes rasgos en la reacción química, los bicarbonatos pasan a ser carbonatos, para así no precipitar, éste no es un efecto permanente, y además depende mucho de condiciones de temperatura, presión y distancia al aparato.

Es por esto que el efecto del uso del aparato, posiblemente no se vea reflejado en una disminución del sarro en artefactos que utilicen agua a superficie libre o que cambien la temperatura del agua, lo cual se debe verificar mediante experimentos.

En síntesis, este sistema resulta muy útil para su uso en instalaciones de agua que poseen redes cerradas, por ejemplo, algún proceso dentro de una planta de tratamiento de agua potable.

## 2) Acelerador iónico, NEW ARA [76]:

Este aparato de aceleración iónica, utiliza un fuerte campo magnético para generar la pérdida de la capacidad incrustante del carbonato de calcio, por lo que, en el presente trabajo, se lo cataloga como un Sistema Desincrustante Magnético.

La tecnología es fabricada por la empresa italiana VOSGES, y basa su funcionamiento en la transformación irreversible de las incrustaciones de calcita en estructuras de aragonita (cristalina,

30 a 50 veces más pequeña), las que no se depositan ni incrustan, y que incluso tiene el poder de desincrustar las cañerías y superficies incrustadas de sarro duro.

Para dicha transformación, el acelerador iónico posee un campo magnético natural, permanente y controlado de 10.000 Gauss, certificado y continuo, donde mediante su configuración interna logra que cada milímetro de agua sea tratado de igual forma, siendo un tratamiento puramente físico, sin necesidad de conectarlo a alguna fuente energética. Así, utilizando la combinación entre este gran campo magnético, y una gran aceleración del flujo (dada por su presión dinámica mínima), logra modificar de manera irreversible la característica incrustante de la molécula de carbonato de calcio.

Existen modelos tanto para agua fría como para agua caliente, del tipo roscado y bridado, cuyos catálogos abarcan de 35 a 45.000 [l/min], tal y como muestra la Figura 4.1. Este amplio rango de caudal, sugiere que su aplicación puede ser tanto para una escala domiciliaria, como industrial.



**vosges**™  
**NEW ARA**™  
super magnetic  
water treatment systems

	Roscado Agua Fría	Roscado Agua Caliente	Bridado Agua Fría
Rango de Caudales [l/min]	35 – 220	40 – 250	450 – 45.000
Rango de Diámetros [pul]	½" – 2"	½" – 2"	2" – 28"
Temperatura Máxima [°C]	35°<	>35°	35°
Presión Min./Máx.** [bar]	2/30	2/20	2/50

\*\*Que aseguran garantía y correcto funcionamiento.

Figura 4.1: Algunos tipos de Aceleradores Iónicos NEW ARA<sup>70</sup>, y sus características técnicas principales. Fuente: Elaboración propia, en base a información facilitada por los proveedores en Chile.

Por otra parte, y para garantizar la efectividad del tratamiento, se deben cumplir las siguientes condiciones de operación:

- Presión dinámica mínima (manométrica), justo aguas abajo del acelerador, de al menos 2 [bar].
- Un filtro de al menos 50 micras, previo al acelerador, y una válvula de no retorno aguas abajo, para garantizar la vida útil del acelerador.
- No superar las presiones máximas de operación, que son particulares para las distintas fichas técnicas, tanto de los aceleradores como de los filtros. Si bien las presiones máximas de los aceleradores rodean los 20 y 50 [bar], para los filtros pueden ser menores.

<sup>70</sup> Existen equipos bridados especiales que soportan temperaturas del agua de hasta 80 [°C], pero deben ser mandados a fabricar por pedido.

Su instalación consiste en retirar una sección de tubería, y colocar el sistema según el diámetro y caudal pertinente al diseño. Además, los aparatos son compatibles con todo tipo de material de tuberías.

Cabe destacar que, aun cuando los fabricantes señalan que la tecnología posee una garantía de por vida (si se cumplen las condiciones de funcionamiento mencionadas), los proveedores en Chile del sistema señalan una garantía mínima de 30 años.

Dentro de los beneficios directos e indirectos, se destacan:

- No se requiere mantención, ni un gasto energético para su operación (nulos costos operacionales). Solo necesitan la realización de purgas de los filtros, donde la periodicidad de estas dependerá de características propias del agua, principalmente la concentración de sólidos suspendidos totales.
- No hay gastos en aditivos químicos y no se interfiere en la química del agua.
- Ahorro energético significativo, por el aumento de la eficiencia de los calentadores de agua.
- Reduce la tensión superficial del agua, convirtiéndose en un mejor medio de disolución, aumentando la eficiencia de detergentes, aditivos, solventes, generando una mezcla más homogénea.
- La efectividad del tratamiento es independiente del recorrido del agua luego de su tratamiento, pudiendo ser muchos kilómetros de largo de tubería.
- Puede tratar durezas extremas, lo que se ha comprobado al tratar durezas de hasta 2.800 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], en caldo iónico de minería.
- Alarga la vida útil de la inversión inmobiliaria de los clientes domiciliarios, referente a sus sistemas y artefactos sanitarios, cuidando sus cañerías, grifería, equipos, calderas, etc.

En cuanto a los inconvenientes de su aplicación, se destacan los efectos adversos por la etapa de desincrustación inicial, que sería crítica mientras más incrustadas se encuentran las tuberías por las que circula agua tratada. Esto, sumado a lo difícil que es dimensionar el nivel de incrustación de una tubería, plantea la necesidad de realizar un correcto diseño de implementación previo, sobre todo para tratamientos de grandes caudales de AP. Así, se recomienda tener un registro de testigos de tuberías de la red a intervenir, para comprobar el grosor de la incrustación y tener una idea de la magnitud y duración de la etapa de desincrustación inicial de las líneas.

### 3) Otros sistemas abatidores de los efectos de aguas duras:

Debido a que en el mercado existe una variada oferta de sistemas que abatidores, a continuación, se presenta el resumen de otros equipos y procesos, de características similares a las ya mencionadas.

- **Sistema DESINCAL** [77]: consiste en la emisión de una onda determinada, y enviada a cierto intervalo de frecuencia con potencia muy elevada. Un fenómeno físico demostrado

científicamente, que consiste en transformar la forma de precipitación de la molécula calcárea, calcita, para que pierda su poder de adherencia convirtiéndose en aragonito.

Su instalación y formato se asemeja mucho a Vulcan, tal y como muestra la Figura 4.2, pero sus proveedores señalan que su efecto es permanente en el tiempo.

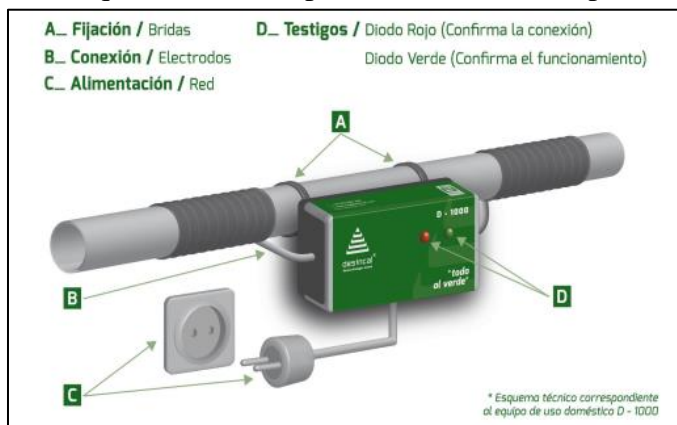


Figura 4.2: Esquema ilustrativo de instalación del sistema DESINCAL. Fuente: <https://www.desincal.com/>

- **Descalcificador Antical RF [78]:** genera una alteración a la polaridad de los pares iónicos de carbonato de calcio disueltos en el agua, manteniendo estas partículas en estado coloidal, es decir, como diminutas partículas cristalinas altamente hidratadas que permanecen en suspensión en el agua hasta temperaturas de 70/75°C. Lo anterior se logra mediante campos electromagnéticos de baja intensidad, generados por el sistema aparato, donde, debido al efecto de la resonancia, inducen una energía tal que altera la polaridad.

Además, los proveedores señalan que, a temperaturas superiores de 70/75°C, se produce la precipitación de los pares iónicos en suspensión, bajo la forma cristalina de aragonito, escasamente adherente, prácticamente soluble en agua, y que se deshace por el simple arrastre mecánico que ejerce el agua en las conducciones cuando fluye por estas.

Su instalación requiere el retiro de una sección de tubería, al igual que para el caso del Acelerador Iónico, pero con la diferencia de que necesita estar conectado a la corriente eléctrica. Un ejemplo de su formato es el que se muestra en la Figura 4.3, para su línea doméstica.



Figura 4.3: Modelo para aplicación doméstica, del aparato Antical RF. Fuente: [https://descalcificador10.com/#comprar\\_un\\_sistema\\_antical\\_rf](https://descalcificador10.com/#comprar_un_sistema_antical_rf)

- **Purificadores de Agua:** existen múltiples sistemas y filtros para purificar el agua potable, los que principalmente se utilizan a pequeña escala para un uso residencial. Estos purificadores utilizan métodos mecánicos, como intercambios iónicos mediante resinas catiónicas, aniónicas, o una combinación de ellas, denominada desmineralización, y métodos químicos mediante polifosfatos o carbón activado al interior de filtros [79].

✓ **Certificaciones:**

Cabe destacar que debido a que existen muchas innovaciones engañosas, ineficaces o incluso estafas, organizaciones internacionales han creado acuerdos para certificar el tratamiento y efecto de sistemas en las aguas. La más importante de estas organizaciones, es la WQA [15], la cual es una asociación internacional sin fines de lucro, de distribuidores y fabricantes de equipos de tratamiento de agua a nivel industrial, comercial y residencial. Esta organización, mediante distintos mecanismos de certificación [80], se asegura de verificar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de agua, tanto para los innovadores, como para los tratamientos más convencionales.

## 5 PROPUESTA Y PLAN DE TRABAJO

---

Luego de haber presentado los antecedentes principales del problema a atacar, comprobando la relación “satisfacción del cliente de AP – dureza del agua”, y levantado, tanto las características de las aguas del Sistema IQQ-AH, como los tipos de sistemas para el abatimiento de los efectos de las aguas duras, se logra diagnosticar el problema de la dureza del AP.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en el análisis de la conveniencia de mitigar los efectos de la dureza en el sistema de AP suministrada a las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, y el impacto que esto podría generar en la percepción y en la tarifa de los usuarios de estos sistemas.

Para esto, y aprovechando el interés de Aguas del Altiplano (empresa responsable de la prestación del servicio sanitario en gran parte del norte de Chile) respecto al problema, se trabaja en conjunto para evaluar los costos de abatimiento de la dureza o la incorporación de técnicas para mitigar sus efectos, y así determinar el sistema de tratamiento más eficiente.

Con el apoyo adicional de Aguas Nuevas S.A. (cuya filial en la región de Tarapacá es Aguas del Altiplano), se realiza la evaluación mencionada, en el sistema particular de Iquique - Alto Hospicio, mediante el siguiente plan de trabajo:

- 1) Recopilación de antecedentes de distintos tipos de tratamiento, tanto abatidores de dureza como mitigantes de sus efectos.
- 2) Analizar ventajas, desventajas y restricciones de cada opción de tratamiento, para su aplicación en localidades del norte de Chile, en particular para el sistema de producción y/o distribución de Iquique-Alto Hospicio.
- 3) Caracterizar el agua cruda y el agua potable suministrada a Iquique y Alto Hospicio, y definir niveles de dureza objetivo para el sistema, a partir de normas internacionales y estudios de percepción de calidad de la industria.
- 4) Determinar la factibilidad de la implementación de cada opción de tratamiento dentro de las etapas de producción y/o distribución de Iquique y Alto Hospicio, mediante el diseño conceptual y dimensionamiento de las distintas alternativas, con el fin de alcanzar la dureza objetivo.
- 5) Estimar los costos de inversión y operación de cada alternativa en estudio, según los valores de referencia de estudios tarifarios desarrollados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios, en conjunto con los antecedentes entregados por proveedores, para luego determinar el eventual impacto tarifario de cada una de las alternativas de tratamiento.
- 6) Seleccionar uno de los tratamientos para realizar una prueba piloto en el laboratorio de calidad de Aguas del Altiplano (recinto Campos de Deportes, Iquique), con el fin de verificar su eficacia en el abatimiento de la dureza o en la eliminación de los efectos de esta sobre las aguas nortinas, y así legitimar los criterios de evaluación considerados.

Cabe mencionar que, durante el desarrollo del presente trabajo de título, se considera como condición inicial y conocida, la referente a infraestructura, producción y facturación de las empresas sanitarias, según los datos actualizados al 31 de diciembre de 2017, razón por la cual dicho año se considera como “año 0” del análisis, para un desarrollo coherente y realista.

Dicho plan de trabajo, y la forma en que se desarrolla, se presenta de manera esquemática en la *Figura 5.1*.

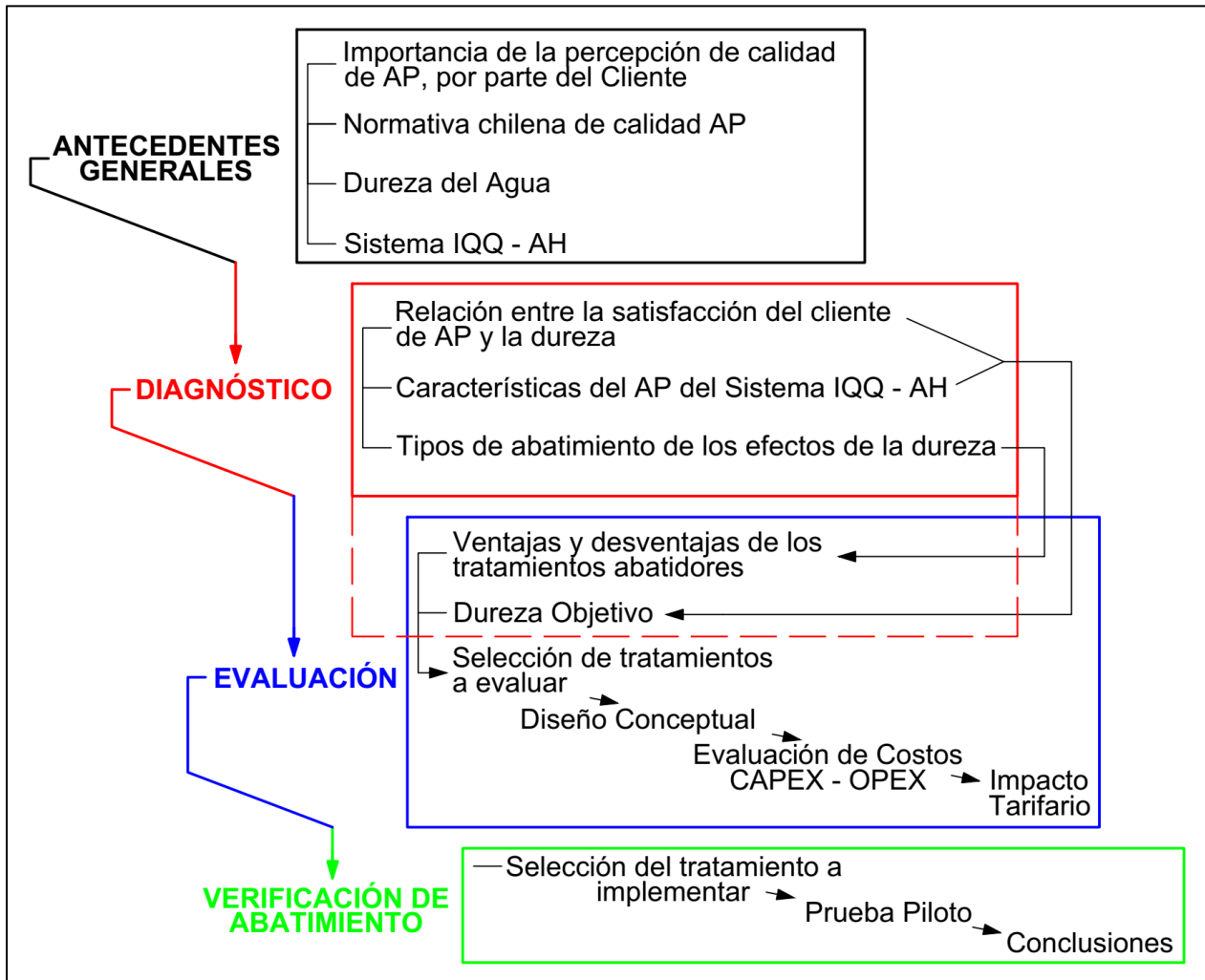


Figura 5.1: Esquema general del desarrollo del plan de trabajo del presente estudio. Fuente: Elaboración Propia.

Dado que la dureza objetivo está definida en el apartado 3.3, a continuación se presentan las ventajas y desventajas de los tratamientos abatidores de los efectos de la dureza, y así continuar con el desarrollo del plan de trabajo presentado.

## 5.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TRATAMIENTOS ABATIDORES

A continuación, en la *Tabla 5.1*, se presenta un resumen de las principales ventajas y desventajas de los tratamientos abatidores de los efectos de las aguas duras, categorizándolos según cuán probable es su elección. Así, mientras más relevantes sean las ventajas, mayores probabilidades de elección tendrá el tratamiento, ocurriendo lo opuesto con las desventajas.

Tabla 5.1: Ventajas y desventajas de los tratamientos abatidores de los efectos de la dureza del AP. Prob. V/D = Probabilidad de ser elegido por sus Ventajas (V) / por sus Desventajas (D).

Tipo Trat.	Ventajas	Desventajas	Prob. V/D
P. C.	Características simples para su ejecución.	Necesidad de grandes volúmenes de Cal y/o Soda.  Producción de grandes cantidades de lodos, que se deben manejar.  Pérdidas de agua, presente en los lodos.	MEDIA / MEDIA
	Supuestamente el más económico de los tratamientos convencionales.		
	Gran precisión cuando el caudal a tratar es grande, y la calidad del agua efluente es uniforme.		
I. I.	Características simples para su control y operación	Aumenta la concentración de Sodio en el agua tratada, y elimina el cloro.	MEDIA / MEDIA
	Remueve más dureza que la precipitación con cal.	Es necesaria agua con bajos contenidos de sólidos suspendidos totales.	
	Genera un agua de calidad prácticamente constante.	Detenciones en su funcionamiento para realizar la regeneración de la resina.	
Evap.- Cond.	De muy fácil aplicación a pequeña escala.	Altos costos energéticos.	MEDIA / BAJA
		Costos adicionales relacionados con la remoción de la dureza precipitada, sobretodo para aplicación a gran escala.	
		Agua tratada demasiado blanda.	
N.	Elimina entre el 80 a 95% de la dureza del agua, junto a gran parte de las moléculas en general.	Altos costos energéticos.	MEDIA / MEDIA
		Pérdidas de agua, por rechazo y retrolavado.	
		Pretratamiento para cuidar la membrana.	
		Agua tratada demasiado blanda.	
Osm. Inv.	Elimina entre el 94 a 98% del calcio y magnesio, y la mayor parte del contenido de sales y iones monovalentes.	Costos energéticos mayores a Nanofiltración.	MEDIA / BAJA
		Pérdidas de agua, por rechazo y retrolavado.	
		Pretratamiento para cuidar la membrana.	
		Agua tratada demasiado desmineralizada.	
Sist. A.E.	Bajos Costos operacionales.	Altos costos de inversión.	ALTA / ALTA
	Elimina los efectos de la dureza.	Posible pérdida del efecto en la distancia.	
		Nulos ejemplos a gran escala.	
Sist. D.M.	Nulos Costos operacionales.	Altos costos de inversión.	ALTA / ALTA
	Elimina los efectos de la dureza.	Presión mayor a 2 [bar] en la planta.	
		Nulos ejemplos a gran escala.	

Cabe mencionar que los Tratamientos Convencionales, trabajan con un porcentaje de caudal de distribución, el que depende de la dureza de las fuentes, la que no es 100% estable, en nuestro país. Sin embargo, faltan mayores catastros y controles para considerar esta desventaja como relevante. De hecho, teniendo una mejor y precisa caracterización de la dureza de las aguas, se tendría un mejor criterio para seleccionar los tratamientos.

## **5.2 SELECCIÓN DE TRATAMIENTOS A EVALUAR**

Al no existir un proceso de ablandamiento del agua que pueda ser considerado universal, su selección depende de las características del agua cruda y de la existencia de otros contaminantes, además de la dureza, que requieran remoción. Sin embargo, aun cuando las características de las aguas crudas del norte de Chile dan a entender que el tratamiento a considerar es la Nanofiltración u la Osmosis Inversa, el análisis del presente trabajo de título considera, como condición inicial, que los otros contaminantes de las aguas ya están controlados.

Para el caso de los Tratamientos Convencionales (Básicos y Avanzados), no hay necesidad de tratar toda el agua a distribuir, para alcanzar una dureza objetivo, en la mezcla con agua sin tratar. Por esta razón, el tamaño de este tipo de plantas a proyectar dependerá de la dureza del agua.

Por otra parte, los Tratamientos No Convencionales, deben tratar toda el AP, sin necesidad de diseñar una mezcla de caudales. Además, estos no cambian las características actuales de las aguas que cumplen la normativa de calidad actual.

Según las desventajas, se descartan del análisis el tratamiento por Evaporación-Condensación, al ser insostenible para grandes caudales de distribución, y la Osmosis Inversa, al ser un tratamiento demasiado profundo del agua, cuando el fin es solo el tratamiento de la dureza. Así, de los tratamientos presentados, dadas sus posibilidades (Tabla 5.1), los elegidos para comparar son:

- 1) Precipitación con Cal (P.C.)
- 2) Nanofiltración (N.)
- 3) Intercambio Iónico (I.I.)
- 4) Sistema Antical Electrónico, VULCAN (S.A.E.)
- 5) Sistema Desincrustante Magnético, Acelerador Iónico NEW ARA (S.D.M.)

Las principales razones por la que se seleccionan los primeros 3 tratamientos, es su característica de ser más tradicionales, convencionales y de aplicación más común. Tanto la Precipitación con Cal como la Nanofiltración en el ámbito industrial, y el 3ro, conocido comúnmente como “Ablandador de Agua”, a nivel particular, por cliente o comunidades de ellos.

Por otra parte, la selección del cuarto y quinto tratamiento se debe a su característica No Convencional, siendo innovadores en su aplicación, tanto a nivel domiciliario como industrial, donde ambos no eliminan la dureza, pero si eliminan los efectos de ella en las aguas que trata.

Realizada la selección de tratamientos a evaluar, se procede a diseñar conceptualmente cada uno de estos, mediante distintos dimensionamientos, para su aplicación en el Sistema IQQ-AH.

## 6 DIMENSIONAMIENTO DE TRATAMIENTOS SELECCIONADOS

---

El dimensionamiento depende tanto de la forma de aplicación, como de los caudales a tratar.

### 6.1 ALTERNATIVAS DE APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Se realiza un Diseño Conceptual para determinar la localización de los puntos a tratar, dentro del Sistema IQQ-AH. Para ello, se analiza el diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del sistema de AP IQQ-AH, presentado en la *Figura 2.8*, determinando así dos alternativas de aplicación para el análisis, distintas en puntos de aplicación y caudales a tratar. Dicha localización de puntos de aplicación se presenta como una que considera un Tratamiento Centralizado, y otra un Tratamiento Disperso, dentro del sistema.

- **Tratamiento Centralizado (TC):** o concentrado, a nivel de sistema de producción de AP, en donde los puntos de aplicación de las alternativas se determinan según su eficiencia y factibilidad técnica para tratar la totalidad del agua. Está enfocado en tener pocos puntos de tratamiento, pero con grandes caudales de agua a tratar, lo que implica una mayor infraestructura en dichos puntos (*Figura 6.1*).
- **Tratamiento Disperso (TD):** o distribuido, a nivel de sistema de distribución de AP. Si bien, también se tiene en consideración el tratamiento de toda el agua a distribuir, en este caso la selección de los puntos de tratamiento tiene como objetivo la distribución del tratamiento con un enfoque local. Así, esta alternativa es más sectorizada, con menores caudales de tratamiento, una mayor cantidad de puntos de aplicación, e infraestructuras de menor tamaño en dichos puntos (*Figura 6.2*).

Los supuestos considerados son los siguientes:

- La verificación de las características mínimas de diseño de los tratamientos a comparar, como condiciones de presión y caudal mínimos o máximos, no se consideran en el análisis, asumiendo entonces que la aplicación de cada uno de los tratamientos en los puntos a evaluar, cumplen todas las características que los tratamientos asumen como condición inicial mínima, para hacer posible y garantizar sus efectos sobre el agua. Lo anterior, forma parte de un Diseño de Ingeniería de Detalles, el que sale de los alcances de este estudio.
- Para el TD, los porcentajes de clientes por sector, mostrados por la *Tabla 6.2*, se asumen constantes durante los 15 años de la proyección, y son calculados con la información obtenida del software ArcGIS<sup>71</sup>, referente a los clientes por sectores de presión de principios de julio de 2018 (en particular al día 6 de dicho mes, debido a que hasta esa fecha se tuvo acceso a la información, facilitada la empresa Aguas Nuevas S.A.). Asumiendo así, que el porcentaje de consumos por sector, es directamente proporcional al porcentaje de clientes por sector.

---

<sup>71</sup>ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica [81]. Para el caso de las empresas sanitarias del grupo Aguas Nuevas, en este sistema se encuentra, de manera online y actualizada, una gran parte de la información de la infraestructura existente, tanto de producción y distribución de AP, como de recolección y disposición de AS.

- El horizonte de diseño, para implementación de las plantas y equipos de tratamiento, alcanzan los 15 años, homologando los años utilizados para las proyecciones de los Planes de Desarrollo (referentes al tiempo de duración de las concesiones de las empresas sanitarias), y considerando al año 2017, como año 0.
- El criterio que se utiliza para determinar las alternativas, es la simpleza y cobertura de la aplicación de los tratamientos, en dichos puntos, a la totalidad del AP distribuida por el sistema IQQ-AH.

Con estos criterios, se llega a las configuraciones esquematizadas, tanto para un Tratamiento Centralizado, como para uno Disperso, mostrados por la *Figura 6.1* y la *Figura 6.2*.

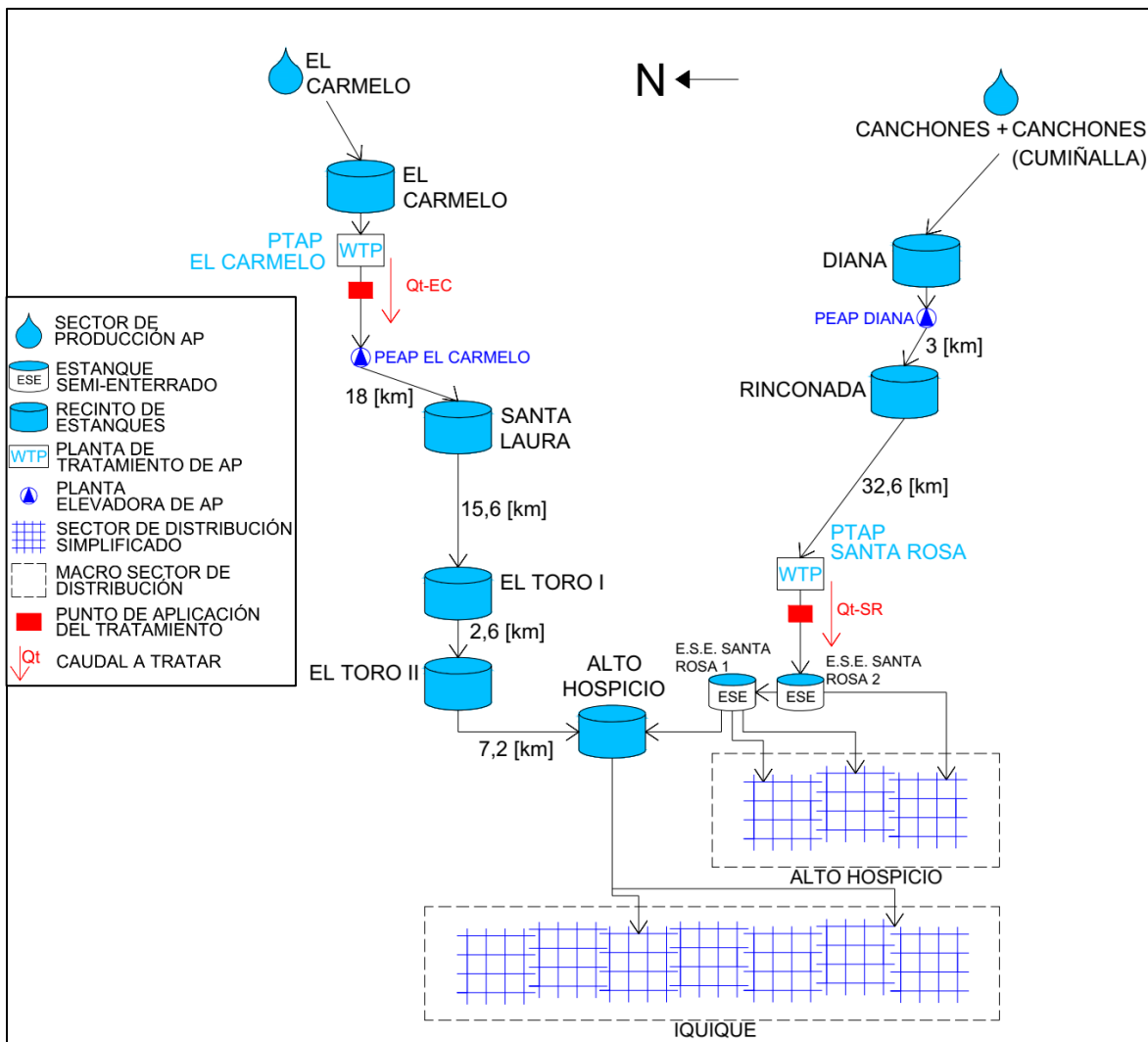


Figura 6.1: Extracto del diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de IQQ-AH, referente al Tratamiento Centralizado (distancias presentadas no proporcionales al valor). Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.1: Significado de las siglas de los caudales a tratar, para el TC.

Qt-EC	Caudal a tratar en PTAP El Carmelo
Qt-SR	Caudal a tratar en PTAP Santa Rosa

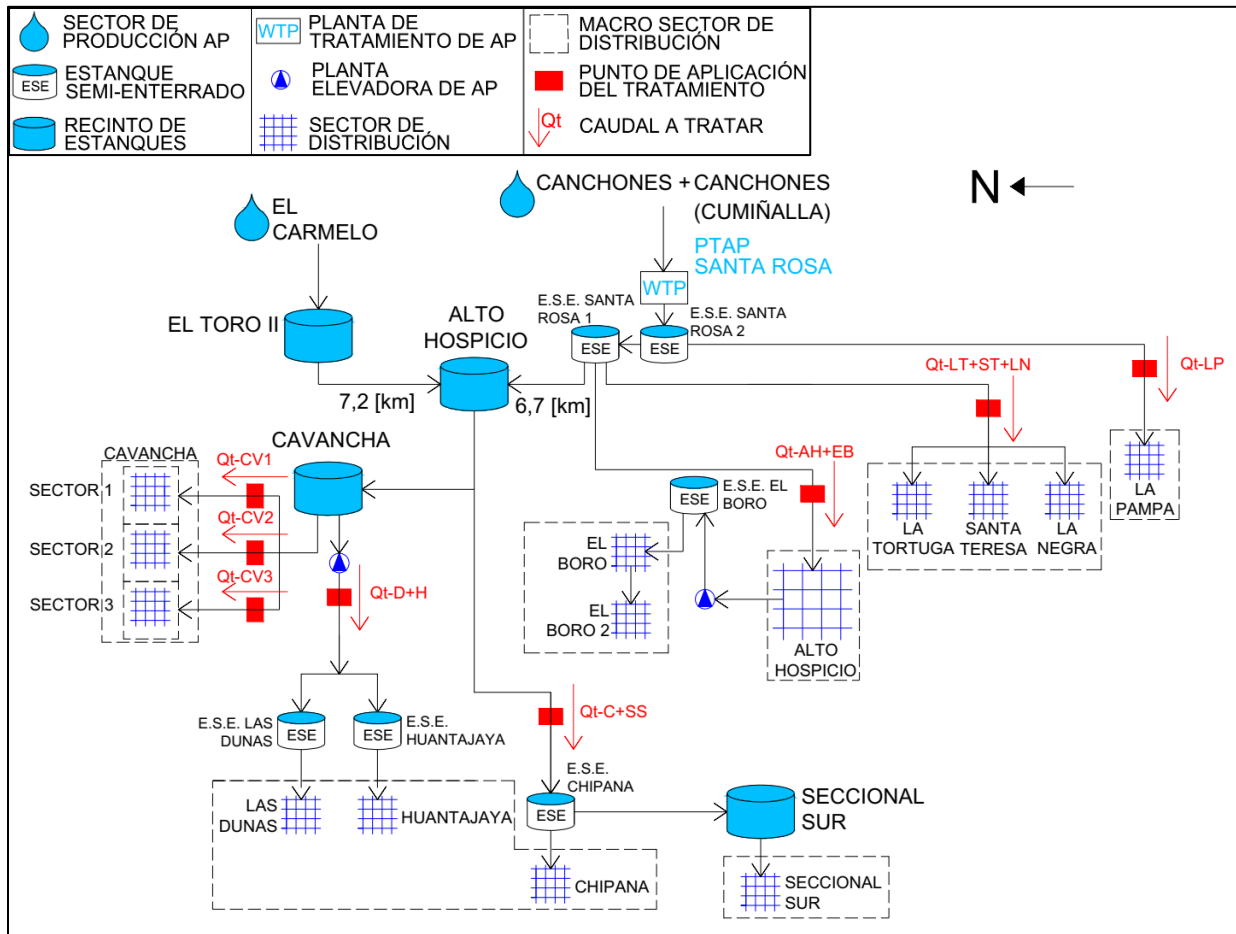


Figura 6.2: Extracto del diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de IQQ-AH, referente al Tratamiento Disperso (distancias presentadas no proporcionales al valor). Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 6.2: Significado de las siglas de los caudales a tratar por sectores de consumo, para el Tratamiento Disperso, y los porcentajes de clientes que posee cada sector, respecto a la totalidad de clientes de Iquique y Alto Hospicio, respectivamente.

Localidad	Sector de distribución	Sigla del caudal	Porcentaje de clientes
Iquique	Cavancha - Sector 1	Qt-CV1	37%
	Cavancha - Sector 2	Qt-CV2	26%
	Cavancha - Sector 3	Qt-CV3	23%
	Las Dunas + Huantajaya	Qt-LD+H	11%
	Chipana + Seccional Sur	Qt-C+SS	3%
<b>Total</b>			<b>100%</b>
Alto hospicio	AH+EB	Qt-AH+EB	57%
	LT+ST+LN	Qt-LT+ST+LN	23%
	LP	Qt-LP	20%
<b>Total</b>			<b>100%</b>

Así, los caudales a tratar son aquellos que salen de las plantas de tratamiento, y que se asumen equivalentes a los caudales de distribución para el sistema IQQ-AH.

## 6.2 CAUDAL DE DISTRIBUCIÓN - SISTEMA IQQ-AH

Los tratamientos se diseñan con los caudales de distribución asociados a los caudales máximos diarios de consumo, debido a que se aplican dentro de la etapa de conducción primaria, pero aguas abajo de las PTAP existentes, como se muestran en la *Figura 6.1* y la *Figura 6.2*.

El caudal de distribución del sistema IQQ-AH, se determina como la suma de los caudales de distribución particulares a cada una de las localidades y estos, a su vez, se obtienen de las bases de datos de facturación de ambas localidades, proyectadas en el tiempo.

Las proyecciones anuales de agua facturada por los clientes de AP de ambas localidades, se determinan siguiendo los procedimientos mostrados en las normativas sanitarias chilenas (principalmente NCh691.Of2015 [82]), en conjunto con los lineamientos de la teoría presentada en las clases de ingeniería sanitaria [83] (detalles en ANEXO M; “Proyección de Demanda”).

Así, y con la información disponible de facturaciones del SIFAC, se procede a determinar la facturación anual, siguiendo el procedimiento que presenta esquemáticamente la *Figura 6.3*.

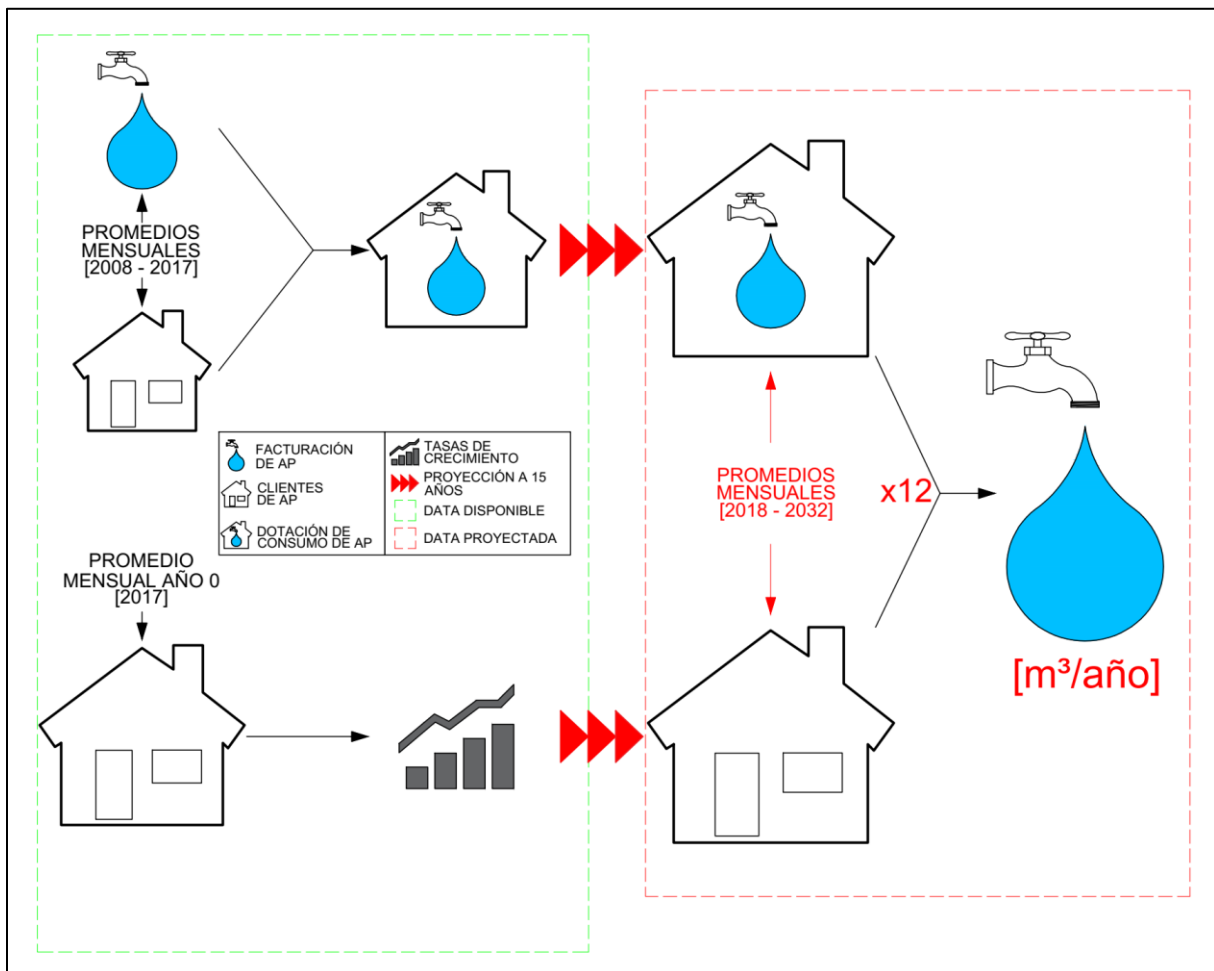


Figura 6.3: Esquema de la determinación de la proyección de facturación anual, tanto para Iquique como para Alto Hospicio. Fuente: Elaboración Propia.

Utilizando las tasas de crecimiento anual de clientes, mostradas por la *Tabla 6.3*, según la información de los Planes de Desarrollo vigentes (en los cuales se utilizan constantes en el tiempo), se obtiene la proyección de la facturación anual de AP para cada una de las localidades en estudio.

Tabla 6.3: Tasas de crecimiento anual de clientes, para cada una de las localidades de estudio,

Tasas de Crecimiento Anual de Clientes	
Iquique	Alto Hospicio
2,96%	2,12%

Con la facturación proyectada, y realizando el cambio de unidades presentado en la ecuación (7.1) se determina la proyección del caudal de consumo medio anual ( $Q_{c_{medio\ año}}$ ).

$$Q_{c_{medio\ año}} \left[ \frac{l}{s} \right] = \frac{\text{Facturación Proyectada} \left[ \frac{m^3}{año} \right]}{31536 \left[ \frac{s}{año} \right] \left[ \frac{m^3}{l} \right]} \quad (6.1)$$

Para obtener los caudales máximos diarios de distribución, se debe amplificar conservadoramente el consumo medio anual, mediante distintos factores, según la *Figura 6.4*.

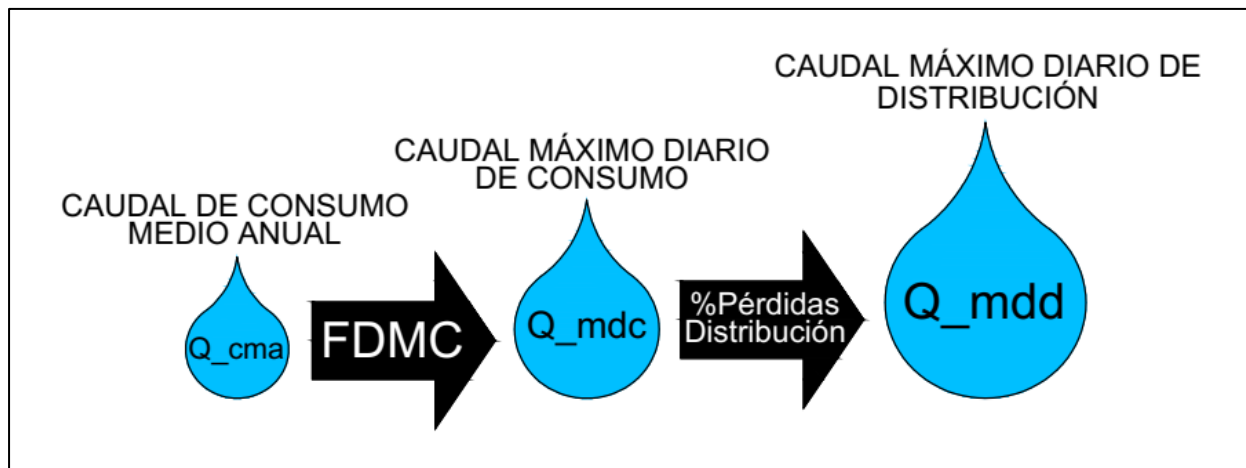


Figura 6.4: Esquema de distintos caudales, necesarios para el diseño sanitario del estudio. Fuente: Elaboración Propia.

Tanto el Factor del Día de Máximo Consumo (FDMC), definido en la NCh691.Of2015 [82], como el  $Q_{mdc}$ , se definen por las ecuaciones (6.2) y (6.3), respectivamente.

$$Q_{md_{año\ i}} [l/s] = Q_{c_{medio\ año\ i}} [l/s] \times FDMC \quad (6.2)$$

$$FDMC = CMMC \times CDMC \quad (6.3)$$

- CMMC = Coeficiente del Mes de Máximo Consumo, definido como el cociente entre el consumo máximo mensual y el consumo medio mensual.
- CDMC = Coeficiente del Día de máximo consumo en el mes de Máximo Consumo, definido como el cociente entre el consumo máximo diario y el consumo medio diario del mes de mayor consumo, cuyo valor mínimo establecido es de 1,1.

Los valores del CMMC se obtienen con la información de facturaciones provenientes de la SIFAC II para el año 2017, particulares para cada localidad. Por otra parte, para el valor del CDMC se asume conservadoramente el mínimo de referencia, tal y como lo muestra la *Tabla 6.4*.

Tabla 6.4: Coeficientes y Factores de máximo consumo, determinados con la data de facturación proveniente de la SIFAC II.

	Coeficientes y Factores de Máximo Consumo	
	Iquique	Alto Hospicio
CMMC	1,08	1,04
CDMC	1,10	1,10
FDMC	1,18	1,15

Asumiendo constantes (para los 15 años del horizonte de diseño) los valores del FDMC presentados, se determinan los Caudales Máximo Diarios de consumo anual para cada localidad. Con estos, se pueden obtener los caudales de diseño a tratar, considerando un cierto nivel de pérdidas en la distribución (%D), según muestra la ecuación (7.4).

$$Q_{distribución} = \frac{Q}{1 - \frac{\%D}{100}} \quad (6.4)$$

Los porcentajes de pérdidas, presentados en la *Tabla 6.5* para la etapa de distribución, se asumen constantes en el tiempo, de manera conservadora. Además, se asumen iguales que para todo el sistema Canchones-El Carmelo-Cumiñalla, según los promedios de pérdidas de los años 2014, 2015 y 2016, utilizando los datos de producción, distribución y facturación del SIFAC [84].

Tabla 6.5: Estimación del porcentaje de pérdidas, en la etapa de distribución, para ambas localidades de estudio.

	Pérdidas [%]	
	Iquique	Alto Hospicio
Distribución (%D)	34,69%	34,69%

Finalmente, en el *Gráfico 6.1*, se presentan las distintas proyecciones de caudales mencionados, para los 15 años del horizonte de diseño. Se obtiene el caudal total de distribución del Sistema IQQ-AH, de 1510 [l/s]. Los valores particulares a Iquique y Alto Hospicio se presentan en la *Tabla 6.6*.

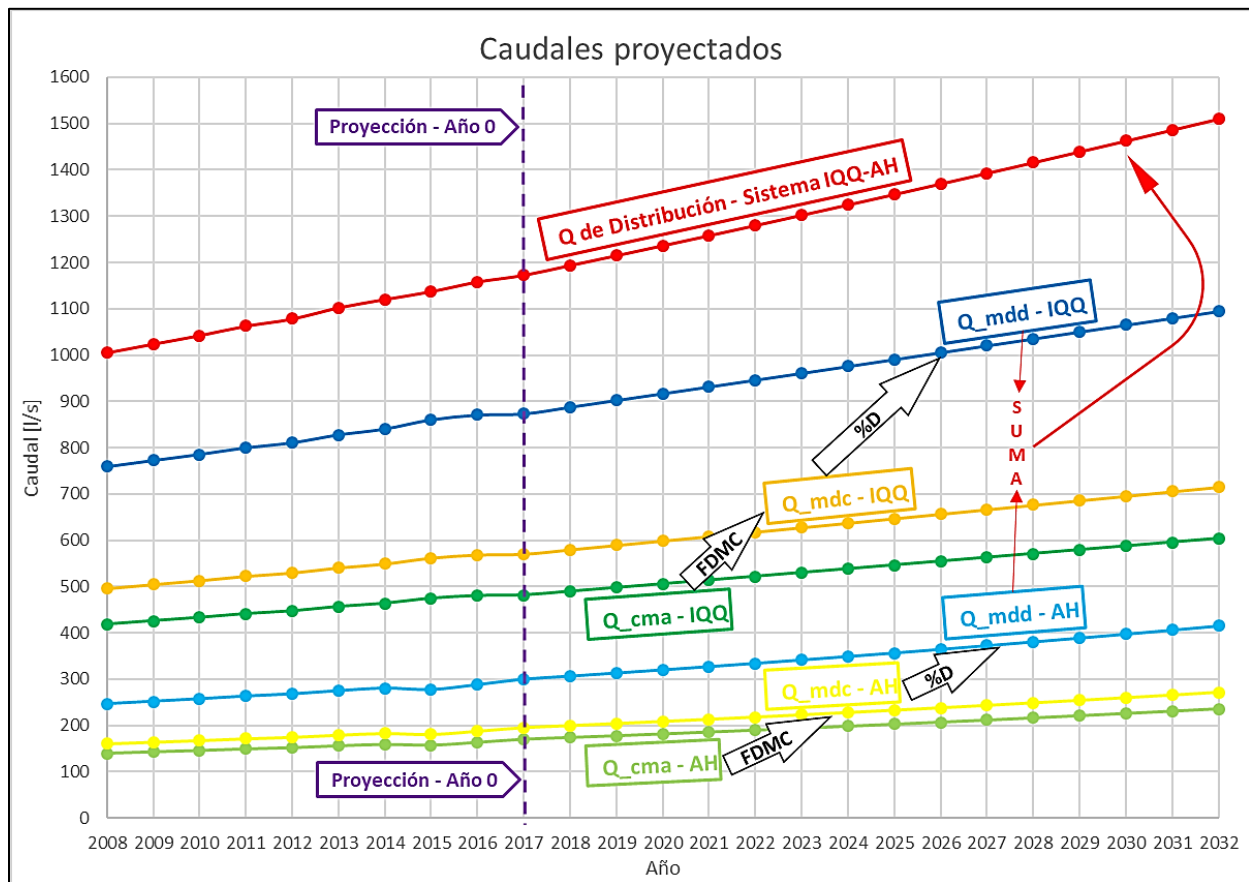


Gráfico 6.1: Caudales proyectados en función de los años, diferenciando los distintos tipos de caudales; de Consumo Medio Anual (\_cma), Máximo Diario de Consumo (\_mdc) y Máximo Diario de Distribución (\_mdd), aplicando los factores (FDMC) y porcentajes de pérdidas de distribución (%D), respectivos.

Tabla 6.6: Caudales máximos diarios de distribución, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referentes al 15vo año de proyección.

Año	Año de estudio	Caudal Máximo Diario de Distribución		Caudal Total de Diseño a Salir desde las PTAP
		Iquique	Alto Hospicio	Sistema IQQ-AH
		[l/s]	[l/s]	[l/s]
15	2032	1095	415	1510

### 6.3 PORCENTAJE DE CAUDAL A TRATAR

Al existir distintas alternativas de aplicación de los tratamientos, existen distintos porcentajes de caudal a tratar, los que a su vez dependen el tipo de tratamiento, y que se describen a continuación.

#### 6.3.1 Tratamiento del tipo Convencional

Sistemas que eliminan la totalidad de la dureza del agua que tratan, y que para lograr la dureza objetivo se debe tratar un porcentaje de las aguas.

- **Alternativa de Aplicación Centralizada:**

Si bien la dureza objetivo seleccionada es de 150 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>], esta difícilmente se encontrará en todos los puntos de tratamiento, debido a las distintas mezclas que ocurren. Así, mientras en la PTAP Santa Rosa se trata solo el 85% del caudal entrante, para que la mezcla con el otro 15% cumpla normativa, en el recinto estanques Alto Hospicio, ocurre una mezcla donde aproximadamente el 68% proviene de la PTAP El Carmelo, y el otro 32% de la PTAP Santa Rosa.

Si se determina un objetivo de dureza a la salida de la PTAP El Carmelo, en ambas localidades se obtienen distintas durezas finales, por lo que se estudia según la localidad de Iquique (ya que da el mayor promedio de dureza para los próximos 15 años). Luego, se itera la dureza a la salida de la PTAP El Carmelo, hasta obtener la dureza objetivo de 150 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] en el promedio de los próximos 15 años, para el agua de distribución de Iquique.

Para todo el Sistema IQQ-AH, se considera una dureza a abatir de 502 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] (correspondiente a la dureza total promedio de la red de AP de Iquique, mostrada en la *Tabla 3.8*), bajo el supuesto de que dicha dureza se mantiene constante en el tiempo, y para todo el sistema IQQ-AH<sup>72</sup>. Luego de realizar la iteración, se obtiene la dureza a la salida de la PTAP El Carmelo, y por lo tanto, el porcentaje de caudal a tratar en dicho punto, para lograr la dureza objetivo en la mezcla, los que se presentan en la *Tabla 6.10*.

Tabla 6.7: Dureza total estimada a la salida de la PTAP El Carmelo, antes y después de ser tratada, según el porcentaje de caudal.

Dureza Total a la Salida de PTAP El Carmelo [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]		Porcentaje a tratar en PTAP El Carmelo
Sin Tratar	Tratada	%
502	155	69%

A continuación, y utilizando sumas proporcionales mostradas por la ecuación (6.5), se obtienen las durezas de las mezclas de caudal, y por consiguiente los porcentajes de caudal que se deben tratar a la salida de cada PTAP, mostrados en la *Tabla 6.11*, para lograr el valor esperado de dureza en la mezcla (la información completa se presenta en la *Tabla 11.21* del ANEXO Ñ; “Porcentajes y Caudales a tratar”).

$$Dureza_{mezcla} = \frac{Q_{Dureza X} * Dureza_X + Q_{Dureza Y} * Dureza_Y}{Q_{Dureza X} + Q_{Dureza Y}} \quad (6.5)$$

$$Dureza_{mezcla} = \frac{Q_{tratado} * 0 + Q_{sin tratar} * 501,8}{Q_{tratado} + Q_{sin tratar}}$$

<sup>72</sup> Lo cual es lejano a la realidad, por lo que se debería tener un control de la dureza en puntos característicos de la red, y así asegurar un estándar de calidad en todos los puntos de distribución.

Tabla 6.8: Resumen de los porcentajes de caudal a tratar, por PTAP y localidad, para eliminar la dureza, y lograr la dureza objetivo en la mezcla con el porcentaje de caudal no tratado.

Año	Año de estudio	Iquique		
		Alto Hospicio	Iquique	
		PTAP Santa Rosa	PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo
		%	%	%
15	2032	71%	71%	69%

• **Alternativa de Aplicación Dispersa:**

Para el caso de esta alternativa, los caudales no sufren una mezcla en sus tratamientos, por lo que el porcentaje a tratar por cada punto será el mismo, y el necesario para lograr la misma dureza que para el tratamiento centralizado, pero respecto al sistema IQQ-AH. Así, en la *Tabla 6.12*, se presenta el porcentaje a tratar en cada punto de tratamiento, y la dureza obtenida.

Tabla 6.9: Dureza total estimada para todo el Sistema IQQ-AH, antes y después de ser tratada, según el porcentaje de caudal.

Dureza Total del Sistema IQQ-AH [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]		Porcentaje a tratar en todos los puntos
Sin Tratar	Tratada	%
502	148	70%

De manera esquemática, los tratamientos del tipo convencional se diseñan conceptualmente en el sistema IQQ-AH, tal y como muestra la *Figura 6.5*, para ambas alternativas de aplicación.

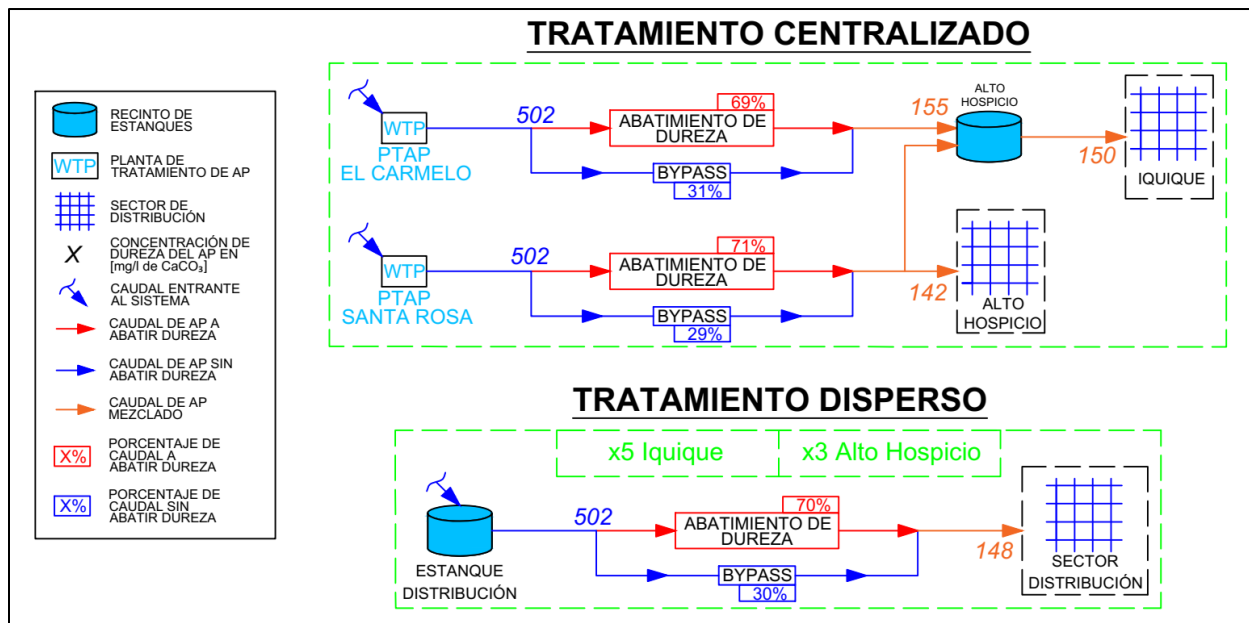


Figura 6.5: Esquemas de implementación de las distintas aplicaciones de los tratamientos Convencionales, en el sistema IQQ-AH. Fuente: Elaboración Propia.

**6.3.2 Tratamiento del tipo No Convencional**

En este caso, los sistemas solo eliminan los efectos de la dureza del agua, por lo que deben tratar la totalidad de las aguas, tanto para su aplicación de forma centralizada, como dispersa, según muestra la *Figura 6.6*.

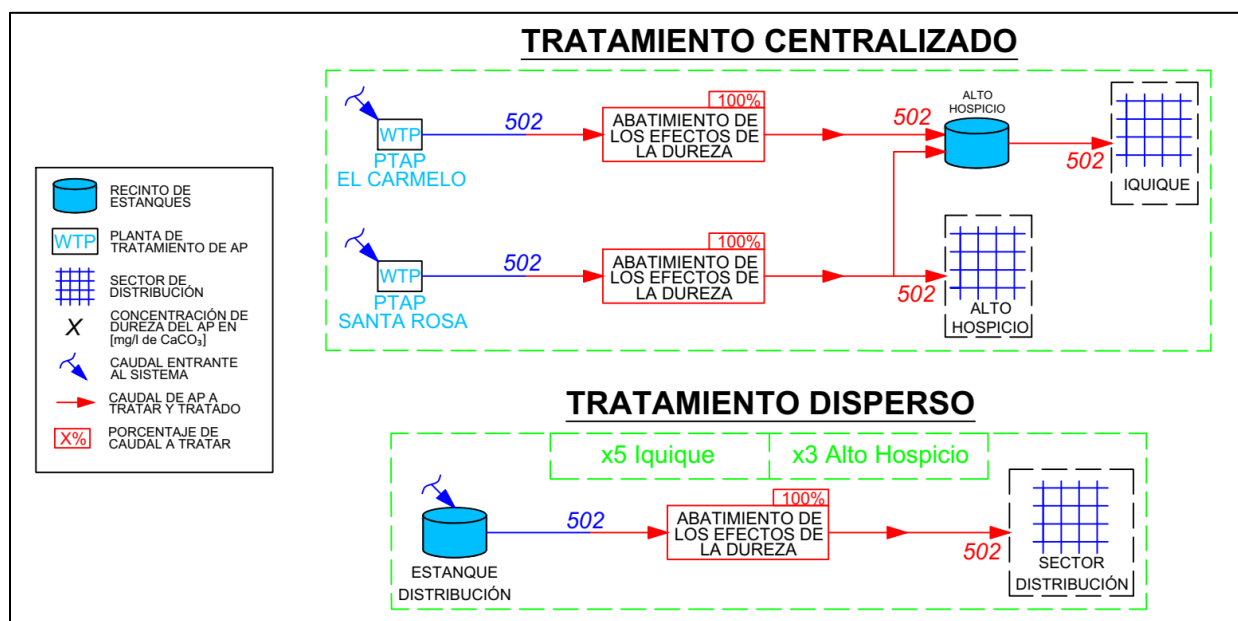


Figura 6.6: Esquemas de implementación de las distintas aplicaciones de los tratamientos No Convencionales, en el sistema IQQ-AH. Fuente: Elaboración Propia.

## 6.4 MAGNITUD DE LOS CAUDALES A SER TRATADOS

A continuación, para cada alternativa, se determinan los caudales a tratar, para así poder determinar los costos de implementación de cada uno de los tratamientos. Así, para determinar dichos caudales, se considera lo siguiente:

- Como los caudales a tratar son variables en el tiempo, se asume que los sistemas de tratamiento tienen mecanismos para controlar, según demanda de AP, el agua a tratar. Así, se asumen constantes los porcentajes anuales de caudal a tratar, en cada punto.
- Para el TD, los caudales consumidos, tanto en Iquique como en Alto Hospicio, se distribuyen porcentualmente en los sectores, según lo mostrado en la Tabla 6.2.
- Se asume que las plantas de tratamiento existentes, son capaces de tratar todos los caudales proyectados dentro del horizonte de diseño.

### 6.4.1 Caudal a Tratar – No Convencional – T. Centralizado

Sabiendo que **PTAP Santa Rosa** abastece a toda la demanda de Alto Hospicio, y que con la misma cantidad de agua aporta al sistema de Iquique (según el supuesto obtenido del estudio para el Balance Oferta-Demanda vigente de Alto Hospicio), se determinan sus caudales correspondientes, según los porcentajes presentados en la Tabla 6.10, se muestran en la Tabla 6.11 (la información completa se presenta en la Tabla 11.17, del ANEXO N; “Caudal Total de Diseño”).

Tabla 6.10: Porcentaje de tratamiento y pérdidas de caudal, asociados a la PTAP Santa Rosa (Filtros Gravitacionales rápidos).

PTAP Santa Rosa	Porcentajes
Caudal tratado por planta	85%
Caudal no tratado por planta	15%
Pérdida de caudal por tratamiento	5%
<b>Pérdida Total</b>	<b>4,25%</b>

Tabla 6.11: Resumen y desglose de los aportes de la PTAP Santa Rosa, a los sistemas de Iquique y Alto Hospicio.

Año	Aporte de PTAP Santa Rosa		PTAP Santa Rosa					
	Iquique	Alto Hospicio	Entrada	A Tratar	No Tratado	Tratado	Pérdidas	Salida
	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
15	415	415	867	737	130	700	37	830

Así, los caudales anuales a tratar, aguas abajo de la PTAP Santa Rosa, serán los correspondientes a la columna “Salida”, de la *Tabla 6.11*.

Por otra parte, la **PTAP El Carmelo** es la encargada de tratar el resto del agua demandada por Iquique, y que no es aportada por la PTAP Santa Rosa. Así, teniendo la demanda total de Iquique, mostrada por la *Tabla 6.6*, y restando el aporte de la PTAP Santa Rosa (*Tabla 6.11*), se obtiene el caudal tratado por la planta, el cual proviene de las fuentes del Sistema de Producción El Carmelo.

A continuación, en la *Tabla 6.12*, se muestra un resumen del aporte de cada una de las PTAP, y los caudales máximos diarios de distribución, con los cuales se abastece la demanda de Iquique (la información completa se presenta en la *Tabla 11.18*, del ANEXO N; “Caudal Total de Diseño”).

Tabla 6.12: Resumen del aporte de caudal de cada una de las PTAP que abastecen al sistema de Iquique, y dicha demanda particular, como caudal máximo diario de distribución, para el último año del horizonte de diseño.

Año	Año de estudio	Aporte de PTAP		Iquique
		Santa Rosa	El Carmelo	Qdistribución
		[l/s]	[l/s]	[l/s]
15	2032	415	680	1095

Finalmente, la magnitud de los caudales de diseño, de las PT No Convencionales, aguas abajo de cada una de las PTAP del sistema IQQ-AH (*Figura 6.1*), son los que muestra la *Tabla 6.13*, y aplicados según *Figura 6.6*.

Tabla 6.13: Caudales de diseño para las PT No Convencionales, estimadas aguas abajo de las PTAP existentes, según *Figura 6.1*.

Año	Año de estudio	Caudal de Diseño aguas abajo de PTAP	
		Santa Rosa	El Carmelo
		[l/s]	[l/s]
15	2032	830	680

#### 6.4.2 Caudal a Tratar – No Convencional – T. Disperso

Teniendo los caudales a tratar (diseño que asegura capacidad de tratamiento en el último año del estudio), tanto para Iquique como para Alto Hospicio, presentados en la *Tabla 6.6*, se pueden determinar los caudales a tratar en cada uno de los puntos mostrados en la *Figura 6.2*, siguiendo los porcentajes presentados en la *Tabla 6.2*, o por el *Gráfico 6.2*, referentes a la totalidad del caudal de distribución de sistema IQQ-AH (mayor detalle en el ANEXO N; “Caudal Total de Diseño”).

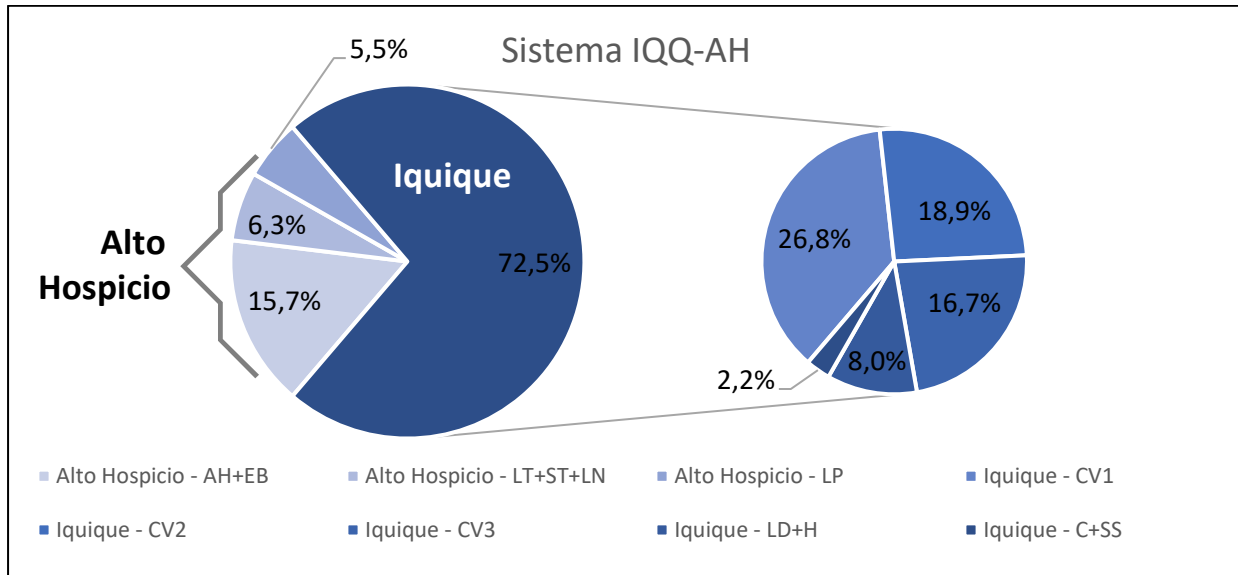


Gráfico 6.2: Gráfico circular de los porcentajes de agua a tratar, según el 100% del agua a distribuir para el sistema IQQ-AH, dada la aplicación dispersa de los tratamientos en cada una de las localidades en estudio.

Finalmente, los caudales de diseño para estimar la magnitud de las PT No Convencionales, en cada uno de los puntos presentados en la *Figura 6.2*, son los que muestra la *Tabla 6.14*, implementados según la *Figura 6.6*.

Tabla 6.14: Caudales de diseño para las PT No Convencionales, estimadas en cada uno de los puntos presentados en la *Figura 6.2*.

Localidad	Sigla	Caudal de diseño por Sector
		[l/s]
Iquique	Qt-CV1	402
	Qt-CV2	287
	Qt-CV3	252
	Qt-LD+H	121
	Qt-C+SS	33
Alto Hospicio	Qt-AH+EB	235
	Qt-LT+ST+LN	94
	Qt-LP	86

### 6.4.3 Caudal a Tratar – Convencional – T. Centralizado

Obtenidos los porcentajes de caudal a tratar (apartado 6.3.1), y los caudales a tratar por los tratamientos no convencionales, se determinan los caudales a tratar aguas abajo de las PT convencional aplicadas de manera centralizada, presentados en la *Tabla 6.15*.

Tabla 6.15: Caudales de diseño para las PT Convencionales, estimadas aguas abajo de las PTAP existentes, según *Figura 6.1*.

Año	Año de estudio	Caudal de Diseño aguas abajo de PTAP	
		Santa Rosa	El Carmelo
		[l/s]	[l/s]
15	2032	595	471

Finalmente, en la *Tabla 6.16*, se muestran los promedios de dureza total en el horizonte de diseño, para ambas localidades y para el sistema total.

Tabla 6.16: Promedios de dureza total, en Iquique, Alto Hospicio y todo el Sistema IQQ-AH, luego de eliminar la dureza en los caudales tratados, para los 15 años del horizonte de diseño.

Promedio de Dureza Total en 15 años		
[mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]		
Iquique	Alto Hospicio	Sistema IQQ-AH
150	142	148

Se comprueba entonces, que la dureza total promedio en Iquique, durante los 15 años del horizonte de diseño, cumple con ser la dureza objetivo planteada.

#### 6.4.4 Caudal a Tratar – Convencional – T. Disperso

Siguiendo el mismo procedimiento anterior, se determinan los caudales a tratar en cada uno de los puntos aplicados de manera dispersa, según muestra la *Figura 6.2*. En la *Tabla 6.17* se presentan los caudales tratados respectivos que, dados los supuestos mencionados, alcanzan una dureza de 148 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] al ser mezclados con los caudales sin tratar, equivalentes al promedio de la dureza total proyectada en 15 años.

Tabla 6.17: Caudales de diseño para las PT Convencionales, estimadas en cada uno de los puntos presentados en la *Figura 6.2*.

Localidad	Sigla	Caudal de Diseño por Sector [l/s]
Iquique	Qt-CV1	284
	Qt-CV2	203
	Qt-CV3	177
	Qt-LD+H	85
	Qt-C+SS	23
Alto Hospicio	Qt-AH+EB	166
	Qt-LT+ST+LN	66
	Qt-LP	60

## 6.5 COMENTARIOS GENERALES

- Al no contar con una data histórica de dureza en la región, no hay conocimiento de su comportamiento en el tiempo, y por lo tanto no se puede realizar una proyección más certera, ni por sondaje ni por punto de distribución. Esto, puede dificultar la implementación real, dado que cambiarían los porcentajes de caudal a tratar, para mantener la dureza objetivo, es decir, el estándar de calidad esperado por este estudio.
- Por otra parte, medir, registrar y controlar la alcalinidad de puntos característicos del sistema, también ayudaría al correcto desempeño de este.
- En el caso de que se requiera disminuir la concentración de dureza objetivo, los caudales a tratar aumentan, y por consiguiente el tamaño de las plantas y los costos respectivos.
- Al fijar el horizonte de diseño para 15 años, antes del cumplimiento de dicho año se deberá invertir en ampliaciones de las plantas, para dar así abasto a la demanda de AP proyectada y esperada, para el año 16 en adelante.

## 7 ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LAS ALTERNATIVAS

---

### 7.1 METODOLOGÍA

Para estimar los costos asociados a la implementación de cada una de las alternativas de tratamiento, dentro de los alcances del estudio, se realizan una serie de supuestos particulares para cada tipo de tratamiento.

En el ejercicio, se determinan los costos, tanto de inversión como de operación, utilizando la información proveniente de los Estudios Tarifarios, tanto los realizados por la SISS [85], como los realizados por las distintas empresas sanitarias del país [86].

Cabe mencionar, que todos los costos estudiados, se encontraban en Pesos Chilenos (CLP) en distintos años, por lo que se utilizaron los valores correspondientes de Unidad de Fomento (UF) de cada año [87], para poder equiparar los distintos costos para las estimaciones, y dejar finalmente los costos de inversión y operación en dicha unidad, facilitando su análisis y comparación.

### 7.2 COSTOS TRATAMIENTOS CONVENCIONALES

Para estas estimaciones de costos, se utilizan los caudales de diseño referentes al tratamiento de los porcentajes del agua definidos anteriormente para este tipo de procesos, y así alcanzar la dureza objetivo en todo el Sistema IQQ-AH, luego de mezclar aguas tratadas y no tratadas.

#### 7.2.1 Costos – Precipitación con Cal (P.C.)

Como se estableció anteriormente, este tipo de tratamiento no solo remueve la dureza, sino que también la turbiedad del agua. Además, se considera lo siguiente:

- Si bien, el tratamiento es similar al tratamiento físico químico convencional, posee tres procesos adicionales: (1) Dosificación de cal, (2) Recarbonatación para restituir del pH y (3) El manejo y disposición de lodos. Dado que Chile no cuenta con este tipo de plantas a nivel centralizado, se estiman de forma particular estos tres procesos adicionales, complementándose con los costos disponibles en los Estudios Tarifarios, referentes al tratamiento físico químico convencional en el país.
- Aun cuando la turbiedad del agua cruda y el caudal de diseño son las dos variables a considerar para los tratamientos convencionales mencionados, el caudal es mucho más relevante, por lo que la relación de costos queda referida solo al caudal.
- Se asume que el tratamiento elimina la totalidad de la dureza del agua que trata.

#### ▸ CAPEX (Costos de Inversión):

Se consideran solo PTAP de la IV y V Región, debido a que las del norte tratan aguas de baja turbiedad y cuyos costos no siguen una correlación y, por otra parte, las del centro y sur poseen realidades geográficas muy diferentes como para considerar su información de CAPEX.

Con los CAPEX de 5 PTAP de la V Región, y una de la IV Región<sup>73</sup>, todas con tratamiento físico químico convencional, se construyen curvas de valorización en función del caudal, de las siguientes componentes de obras:

- |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1) Obras Civiles (O.C.)            | 2) Tuberías y Accesorios (T.A.)    |
| 2) Equipos Electromecánicos (E.E.) | 3) Instalaciones Eléctricas (I.E.) |

El detalle de cada uno de los costos, y la forma en que se estiman sus valores en función de los caudales de diseño de plantas existentes, está en el ANEXO O; “CAPEX; Precipitación con Cal”.

A los valores obtenidos para cada planta, se agrega un aumento estimado en un 20% correspondiente a la infraestructura necesaria para la dosificación de Cal y de dióxido de carbono (Recarbonatación). El monto total de inversión de las plantas evaluadas se presenta en la *Tabla 7.1*.

Tabla 7.1: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de Precipitación con Cal, mediante distintos tipos de tratamiento.

Tipo de Tratamiento	Punto a Tratar		Q Diseño [l/s]	Inversión [UF]
Centralizado	PTAP Santa Rosa		595	114.384
	PTAP El Carmelo		471	92.953
	<b>Total</b>			<b>207.337</b>
Disperso	Alto Hospicio	AH+EB	166	40.275
		LT+ST+LN	66	23.075
		LP	60	22.027
	Iquique	CV1	284	60.592
		CV2	203	46.597
		CV3	177	42.241
		LD+H	85	26.344
		C+SS	23	15.616
	<b>Total</b>			<b>276.767</b>

► OPEX (Costos de Operación):

Dadas las características de las PT de Precipitación con Cal, y la nula aplicación de estas en sistemas de producción en nuestro país, en los estudios tarifarios disponibles no se incluyen los costos adicionales asociados a la dosificación de cal y otros reactivos (principalmente cenizas de soda, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), Recarbonatación con CO<sub>2</sub> y manejo y disposición de lodos, por lo que se estiman desglosando los costos en los siguientes ítems:

- 1) OPEX PT físico químico Convencional (OPEX C.).
- 2) OPEX por Agregados Químicos para la precipitación con Cal (OPEX Q.).
- 3) OPEX por manejo y disposición de Lodos (OPEX L.).

<sup>73</sup> Cabe mencionar, que algunos datos son eliminados de la línea de los gráficos, al escaparse en demasía de la tendencia de los otros datos analizados, logrando así una correlación más uniforme.

Se obtienen los OPEX (componentes y supuestos en el ANEXO Q; “OPEX; Precipitación con Cal”), que determinan los costos totales de operación, para todo el Sistema IQQ-AH, presentados de manera resumida en la *Tabla 7.2*, para cada alternativa de implementación.

Tabla 7.2: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación de Precipitación con Cal.

Año	Año de estudio	Tratamiento Centralizado			Tratamiento Disperso		
		Santa Rosa	El Carmelo	Operación IQQ-AH	Alto Hospicio	Iquique	Operación IQQ-AH
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	153.039	145.248	298.287	149.052	323.612	472.664
1	2018	155.749	146.835	302.584	150.405	326.547	476.952
5	2022	167.270	153.060	320.329	156.153	338.501	494.654
10	2027	183.154	160.356	343.510	164.078	353.684	517.762
15	2032	201.334	167.145	368.479	173.147	369.482	542.629

### 7.2.2 Costos – Nanofiltración (N.)

Los supuestos y consideraciones, utilizados para la estimación de costos, son los siguientes:

- En Chile, ninguna empresa sanitaria cuenta con plantas de Nanofiltración, pero sí con plantas de tratamiento que utilizan Osmosis Inversa, especialmente entre la XV y II Región, por lo que se utiliza la información disponible de dichas plantas para realizar la estimación de costos, con algunas salvedades que se detallan en particular más adelante.
- Si bien, los costos asociados a las tecnologías de Nanofiltración y Osmosis Inversa son similares, la primera tiene una menor capacidad de remoción de sustancias y elementos disueltos. Por esta razón, la Nanofiltración tiene un costo de inversión levemente menor y un menor costo de operación, al trabajar con presiones inferiores. Sin embargo, los proveedores de equipos afirman que es difícil establecer las diferencias sin contar con un proyecto para un caso específico, por lo que para efectos de las estimaciones de costos se asumirá que la Nanofiltración y la Osmosis Inversa son equivalentes.
- Como particularidad, se considera que los CAPEX de Nanofiltración, referentes a los Equipos Electromecánicos y de las Instalaciones Eléctricas, son un 10% más baratos que para una planta de Osmosis Inversa, debido a la necesidad de bombas de menor capacidad.
- Se asume que el tratamiento por Nanofiltración elimina la totalidad de la dureza del agua que trata.

#### ▸ CAPEX (Costos de Inversión):

Según los datos de los estudios tarifarios de las sanitarias entre la XV y III Región, se extrae la información de los CAPEX de 12 plantas de tratamiento por Osmosis Inversa, en donde la principal variable es el caudal de diseño, influyendo adicionalmente en la concentración de sales en la definición del porcentaje de rechazo. Sin embargo, el análisis de este último escapa de los alcances del estudio.

Usando el mismo criterio de las valorizaciones anteriores, se construyen curvas de costo para las distintas componentes de obra, que se presentan en el ANEXO R; “CAPEX; Nanofiltración”, y así, obtener los resultados para los sistemas modelados, presentados en la *Tabla 7.3*.

Tabla 7.3: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de Nanofiltración, mediante distintos tipos de tratamiento.

Tipo de Tratamiento	Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	Inversión [UF]	
Centralizado	PTAP Santa Rosa	595	1.020.834	
	PTAP El Carmelo	471	811.535	
	<b>Total</b>		<b>1.832.369</b>	
Disperso	Alto Hospicio	AH+EB	166	297.066
		LT+ST+LN	66	129.084
		LP	60	118.852
	Iquique	CV1	284	495.485
		CV2	203	358.813
		CV3	177	316.270
		LD+H	85	161.008
		C+SS	23	56.242
		<b>Total</b>		<b>1.932.820</b>

▸ OPEX (Costos de Operación):

Si bien la información de costos operacionales de producción contenida en las planillas de cálculo de los estudios tarifarios permite calcular el costo de la producción a nivel de empresa, dicho cálculo no es posible de realizar por tipo de planta de tratamiento. Por esta razón, se estiman los OPEX a través de los principales ítems de este costo que, en este caso, son la energía y el suministro de productos químicos (principalmente anti-incrustantes).

Así, con la información del consumo anual de energía (kilowatts hora al año), de las tres PT de Osmosis Inversa, existentes entre la XV y la I Región, y fijado el precio de la energía (52 pesos chilenos por kilowatts hora de consumo, según la tarifa AT3 de 2014), se obtiene una relación del Costo de Operación por Consumo de Energía (OPEX E., disminuido en un 10% <sup>74</sup>) en función de los caudales tratados por las PT, tal y como se muestra en el ANEXO S; “OPEX; Nanofiltración”.

Por otra parte, para la estimación de los OPEX por el suministro de Agregados Químicos (OPEX Q.), se realiza una estimación del gasto unitario de productos químicos, también basada en datos reales de consumo anual, y una estimación del volumen producido de acuerdo al caudal de diseño de las plantas, en este caso de la XV y I Región (Arica, La Tirana y Huara). Así, se genera una relación de dicho costo en función del caudal tratado (ver ANEXO S; “OPEX; Nanofiltración”).

Cabe mencionar que, los costos en reactivos químicos y en energía eléctrica no son los únicos costos operacionales asociados a la producción de agua por Osmosis Inversa, faltando incluir los

<sup>74</sup>En relación al uso de bombas de menor capacidad en comparación a una planta de Osmosis Inversa.

costos directos de los operadores, otros consumos de energía, etc. Para éstos, denominados Otros OPEX (O. OPEX), se ha supuesto que constituyen un valor del 50% adicional a los gastos de energía y reactivos (conservadoramente, según la información de estudios tarifarios más completos, pero de otras regiones).

A modo de síntesis, en la *Tabla 11.58* y la *Tabla 11.59* del ANEXO S; “OPEX; Nanofiltración”, se presentan los OPEX, según cada tipo de costo dada la aplicación del tratamiento abatidor de los efectos de la dureza por Nanofiltración, obteniendo finalmente, los costos totales de operación, para todo el Sistema IQQ-AH en estudio, presentados de forma resumida en la *Tabla 7.4*, para cada alternativa de implementación.

Tabla 7.4: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación de Nanofiltración.

Año	Año de estudio	Tratamiento Centralizado			Tratamiento Disperso		
		Santa Rosa	El Carmelo	Operación IQQ-AH	Alto Hospicio	Iquique	Operación IQQ-AH
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	66.413	61.532	<b>127.944</b>	35.096	98.679	<b>133.775</b>
1	2018	67.843	62.358	<b>130.201</b>	35.800	100.224	<b>136.024</b>
5	2022	73.921	65.599	<b>139.520</b>	38.791	106.516	<b>145.307</b>
10	2027	82.299	69.398	<b>151.697</b>	42.916	114.507	<b>157.423</b>
15	2032	91.639	72.733	<b>164.372</b>	47.513	122.500	<b>170.013</b>

### 7.2.3 Costos – Intercambio Iónico (I.I.)

Se considera los siguientes:

- Este sistema de tratamiento es el más usado a nivel domiciliario, mediante el empleo de resinas sintéticas, debido a que presenta un diseño simple, facilidades operacionales, y que no son necesarios mayores conocimientos técnicos.
- Al no contar con información de su tratamiento a nivel centralizado en el país, se extrapolan los costos conocidos, tanto de inversión como de operación a nivel domiciliario, considerando una serie de supuestos particulares y conservadores.
- Así, se asume que un ablandamiento de agua por Intercambio Iónico a nivel domiciliario, es equivalente al mismo tratamiento, pero aplicado de forma centralizada, a un mayor caudal. Entonces, todo tipo de costo será proporcional a la cantidad de agua que se trate.
- Se asume que el tratamiento por Intercambio Iónico elimina la totalidad de la dureza del agua que trata.

#### ▷ CAPEX (Costos de Inversión):

Existen diversos modelos de ablandadores de intercambio iónico, que van desde los 700.000 hasta el 1.200.000 de pesos chilenos (al 31 de diciembre de 2018), los cuales tienen un costo de instalación, que equivale aproximadamente a un tercio del costo del equipo (según diversos proveedores). A continuación, se selecciona el valor más barato de equipo y, de forma equivalente

con las estimaciones anteriores, este costo se pasa a UF, obteniendo el valor referencial de un equipo de Intercambio Iónico por cliente.

A continuación, y bajo el supuesto de que el costo del equipo por cliente disminuye en un 50%<sup>75</sup>, al ser aplicado de forma centralizada, se obtiene un costo de inversión de 12,18 UF por cliente, al cual se le agrega el costo de instalación del equipo, que se asume un tercio del valor de la inversión, para cada alternativa. Así, la suma de ambos costos se estima equivalente a los Costos de Infraestructura (C.INF., compuestos por; Obras Civiles, Tuberías y Accesorios, Equipos Electromecánicos e Instalaciones Eléctricas), que tendría el tratamiento centralizado.

Finalmente, y conocidos los clientes abastecidos Equivalentes (E.)<sup>76</sup>, por cada punto de aplicación, se obtienen los CAPEX para el TC y TD, tal y como muestran la *Tabla 7.5*.

Tabla 7.5: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de Intercambio Iónico, mediante distintos tipos de tratamiento.

Tipo de Tratamiento	Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	Inversión [UF]	
Centralizado	PTAP Santa Rosa	595	923.016	
	PTAP El Carmelo	471	621.039	
	<b>Total</b>		<b>1.544.055</b>	
Disperso	Alto Hospicio	AH+EB	166	261.843
		LT+ST+LN	66	108.388
		LP	60	99.042
	Iquique	CV1	284	401.686
		CV2	203	288.662
		CV3	177	253.481
		LD+H	85	125.084
		C+SS	23	38.446
	<b>Total</b>		<b>1.576.632</b>	

Cabe mencionar que, el desglose porcentual de cada una de las partidas que componen los Costos de Infraestructura, se asumen equivalentes al de una planta de Precipitación con Cal, pero cambiando el porcentaje del Costo de Obras Civiles con el de Equipos Electromecánicos, debido al uso de equipos de mayor tecnología. Así, se obtienen los porcentajes presentados en el ANEXO T; “CAPEX; Intercambio Iónico”, y que se utilizan más adelante para calcular la anualidad de la inversión.

<sup>75</sup> Se trata de equipos equivalentes a los reales, pero que tratarían caudales mucho mayores, por lo que se asume que su costo unitario equivalente debe ser menor.

<sup>76</sup> Clientes abastecidos equivalentes a los caudales a tratar, para cada alternativa, ya que no se trata la totalidad del agua a distribuir, para alcanzar la dureza objetivo en la mezcla.

► OPEX (Costos de Operación):

Dadas las características de las PT de Intercambio Iónico, y la nula aplicación de estas en sistemas de producción en nuestro país, en los estudios tarifarios no se encuentra información que se pueda asociar a sus OPEX particulares, referentes al recambio de la resina, los consumos de agua y sal (cloruro de sodio) para la regeneración, ni el consumo de energía. Sin embargo, estos se estiman mediante supuestos desglosando dichos costos en los siguientes ítems:

- 1) OPEX tratamiento Equivalente por Cliente (OPEX E.C.):
  - a. OPEX por el Cambio de Resina (OPEX R.).
  - b. OPEX por Consumo de Agua para la regeneración (OPEX A.).
  - c. OPEX por Consumo de Sal para la regeneración (OPEX S.).
  - d. OPEX por Consumo de Energía (OPEX E.).
- 2) OPEX transporte y disposición de Lodos (OPEX L.).
- 3) OPEX Servicios de Operación y mantención (OPEX O.).

Los componentes de los OPEX, y sus correspondientes supuestos, se desarrollan en el ANEXO U; “OPEX; Intercambio Iónico”, según la información del tratamiento a nivel domiciliario, para el ítem OPEX E.C., y con información de los estudios tarifarios para los OPEX O. y de Lodos.

Finalmente, en ANEXO U; “OPEX; Intercambio Iónico” (*Tabla 11.84 y Tabla 11.85*) se presentan los OPEX, según cada tipo de costo dada la aplicación del tratamiento abatidor de los efectos de la dureza por Intercambio Iónico, obteniendo así, los costos totales de operación, para todo el Sistema IQQ-AH en estudio, presentados en la *Tabla 7.6*.

Tabla 7.6: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación de Intercambio Iónico.

Año	Año de estudio	Tratamiento Centralizado			Tratamiento Disperso		
		Santa Rosa	El Carmelo	Operación IQQ-AH	Alto Hospicio	Iquique	Operación IQQ-AH
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	257.235	231.581	<b>488.816</b>	126.867	362.365	<b>489.232</b>
1	2018	262.843	234.958	<b>497.801</b>	129.630	368.561	<b>498.192</b>
5	2022	286.666	248.355	<b>535.021</b>	141.370	393.918	<b>535.287</b>
10	2027	319.502	264.473	<b>583.975</b>	157.550	426.479	<b>584.029</b>
15	2032	357.006	280.004	<b>637.010</b>	176.030	460.741	<b>636.771</b>

Aun cuando se realizaron estimaciones conservadoras, con el fin de no exagerar los costos asociados a la operación de las plantas de intercambio iónico proyectadas, este tratamiento posee los mayores costos (con respecto a los Tratamientos Convencionales), por lo que, para comprobarlos, se debe realizar una Ingeniería de Detalle de este tipo de tratamiento.

### 7.3 COSTOS TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES

Para estas estimaciones de costos, tal y como se menciona anteriormente, se utilizan los caudales de diseño referentes al tratamiento de la totalidad del agua a distribuir, para todo el Sistema IQQ-AH. Lo anterior hace referencia al diseño de tratamientos que no eliminan la dureza, si no que cambian sus características para no generar sus efectos negativos (principalmente la incrustación), debiendo tratar la totalidad del AP a distribuir. Un supuesto importante para estos, es que se asume que funcionan según especifican en sus folletos técnicos.

#### 7.3.1 Costos – Sistema Antical Electrónico, VULCAN (S.A.E.)

Previo a estimar los costos, se debe considerar que:

- La estimación, se realiza según los catálogos y el valor aproximado de solo un equipo de su línea comercial, entregados por el proveedor, por razones de confidencialidad.
- Si bien este sistema posee algunas desventajas que la hacen posiblemente menos atractiva de implementar, en cuanto a la efectividad de su tratamiento, tanto en el tiempo como en la distancia, para efectos del presente estudio, se asume que el tratamiento logra abatir los efectos de la dureza en el agua. De esta forma, la estimación de este tratamiento intenta incorporar a otros tratamientos innovadores similares, tanto en efectos como en costos, disponibles en el mercado.
- Según el catálogo disponible, el modelo de mayor capacidad en cuanto a caudal, es de 800 [m<sup>3</sup>/hr], que equivale 222,22 [l/s]. Pero, debido a que en algunos puntos de tratamiento los caudales a tratar son mayores que la máxima capacidad, se debe separar el caudal en varios equipos, donde el costo estará incorporado dentro de la partida de Obras Civiles, como se detalla más adelante.
- Para obtener una estimación más apropiada, se debe establecer alguna especie de alianza comercial o trato, obteniendo así los costos de cada modelo en particular, y que fueron retenidos por confidencialidad.

##### ▸ CAPEX (Costos de Inversión):

Según el catálogo publicado [75] por la empresa VULCAN para su venta en España, los equipos se clasifican por tamaño, dependiendo de su máxima capacidad de caudal en [l/hr] para su “Línea residencial”, o en [m<sup>3</sup>/hr] para su “Línea Comercial” y “Línea Industrial”, abarcando así caudales de van desde los 0,83 [l/s] hasta los 222,22 [l/s], tal y como muestra la *Tabla 7.7*<sup>77</sup>.

---

<sup>77</sup> Cabe mencionar que no se señalan los diámetros máximos de las secciones tubulares de cada modelo, debido a que dicho análisis corresponde a una Ingeniería de Detalles, que se aleja del presente estudio.

Tabla 7.7: Capacidad máxima y consumo de energía, de cada uno de los modelos del S.A.E., presentes en el catálogo Se asume su conexión durante 24 [hr], en los 365 días del año.

Línea	Modelo	Máxima Capacidad		Consumo Energía	
		[m <sup>3</sup> /hr]	[l/s]	[Watt]	[KWH/año]
Residencial	Vulcan 3000	3,00	0,83	2	17,52
	Vulcan 5000	8,00	2,22	2	17,52
Comercial	Vulcan S10	15,00	4,17	2,25	19,71
	Vulcan S25	30,00	8,33	2,25	19,71
	Vulcan S50	70,00	19,44	2,25	19,71
	Vulcan S100	120,00	33,33	2,5	21,9
Industrial	Vulcan S150	180,00	50,00	2,5	21,9
	Vulcan S250	350,00	97,22	2,75	24,09
	Vulcan S350	500,00	138,89	2,75	24,09
	Vulcan S500	800,00	222,22	3,25	28,47

Se cuenta sólo con el valor del modelo “Vulcan S50”, facilitado por el proveedor, de 1.900.000 pesos chilenos (al 31 de diciembre de 2018). Ante la falta de otras cotizaciones, se asume en este ejercicio un costo lineal para estos equipos en función de la capacidad máxima de caudal a tratar, en [l/s] de acuerdo a la ecuación (7.1) (C.E.; Costo de Equipo).

$$C.I.C.E. = 3,545 * Q_{m\acute{a}ximo} \quad (7.1)$$

Además del costo del equipo, se asume un costo de instalación (C.Ins.) equivalente al 10% del costo del equipo, para todos los modelos (según información corroborada por el proveedor).

Adicionalmente, para la integración del equipo a los procesos de tratamiento, se debe agregar el valor de las obras y suministros complementarios, identificadas como Obras Civiles (O.C.), Tuberías y Accesorios (T.A.) e Instalaciones Eléctricas (I.E.). De acuerdo a los estudios tarifarios<sup>78</sup>, estos costos alcanzan del orden de 2,3 veces el valor del equipo y su instalación (relación porcentual de cada ítem en la *Tabla 11.86*, del ANEXO V; “Costos Sistema Antical Electrónico”).

Conocidos los caudales de diseño de cada alternativa y punto de aplicación, se obtienen los modelos de S.A.E. necesarios para abastecer la demanda de diseño, y así los CAPEX, que se muestran en detalle para cada alternativa en el ANEXO V; “Costos Sistema Antical Electrónico”, y resumidamente a continuación en la *Tabla 7.8*.

<sup>78</sup> Referentes a los costos de las PEAP. Información facilitada por parte de Aguas del Altiplano, referente a sus estudios tarifarios, y en particular su Anexo 7, que hace referencia a “Valorización y CTLP de Infraestructura de Agua Potable”, Tabla A.13. de “Planta Elevadora de Agua Potable: Tipo A”.

Tabla 7.8: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de S.A.E., mediante distintos tipos de tratamiento.

Tipo de Tratamiento	Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	Inversión [UF]	
Centralizado	PTAP Santa Rosa	830	889	11.553	
	PTAP El Carmelo	680	700	9.098	
	<b>Total</b>			<b>20.651</b>	
Disperso	Alto Hospicio	AH+EB	235	242	3.141
		LT+ST+LN	94	97	1.264
		LP	86	97	1.264
	Iquique	CV1	402	444	5.777
		CV2	287	319	4.152
		CV3	252	256	3.322
		LD+H	121	139	1.805
		C+SS	33	33	433
	<b>Total</b>			<b>21.158</b>	

La Capacidad Total de Tratamiento (C.T.T.), para un TC, se alcanza con 4 equipos “Vulcan S500” en la PTAP Santa Rosa, y en El Carmelo, con 3 de estos más un equipo “Vulcan S100”.

Por otra parte, la C.T.T. en un TD, se logra con los siguientes modelos en los puntos a tratar:

- AH+EB: “Vulcan S500” y “Vulcan S50”.
- LT+ST+LN y LP: “Vulcan S250”.
- CV1: 2 equipos “Vulcan S500”.
- CV2: “Vulcan S500” y “Vulcan S250”.
- CV3: “Vulcan S500” y “Vulcan S100”.
- LD+H: “Vulcan S350”.
- C+SS: “Vulcan S100”.

▸ OPEX (Costos de Operación):

Tal y como se calculó anteriormente, referente a los OPEX de las empresas sanitarias, se utiliza el *Gráfico 11.13* y su correspondiente ecuación (11.27), para calcular los costos del S.A.E., debido a que se asume que la facturación será la misma.

Sin embargo, los valores obtenidos se aminoran debido a que, de las partidas que contemplan los OPEX (recordar ANEXO P; “Costos Directos de Operación y Mantenimiento”), solo son necesarias de considerar las referentes a Materiales y Repuestos, Servicios de Laboratorio y Servicios de Operación y Mantenimiento, que en su conjunto, según los estudios tarifarios de variadas empresas sanitarias, corresponden al 35% del costo total de operación, que se obtiene con la ecuación (11.27). Así, se determinan los OPEX Snt. (OPEX, referente a las empresas Sanitarias) para cada alternativa, como se muestra en la *Tabla 11.89* y *Tabla 11.90*, del ANEXO V; “Costos Sistema Antical Electrónico”.

Otro costo de operación, de momento importante, es el consumo eléctrico, cuyo resultado anual se muestra para cada alternativa también en el ANEXO V; “Costos Sistema Antical

Electrónico”, los cuales son muy pequeños dado el bajo consumo anual de cada equipo<sup>79</sup>, presentado en la *Tabla 7.7*. De esta forma, se puede determinar el costo de operación total, para cada alternativa, tal y como se presenta en la *Tabla 7.9*, de manera sintetizada.

Tabla 7.9: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación del Sistema Antical Electrónico.

Año	Año de estudio	Tratamiento Centralizado			Tratamiento Disperso		
		Santa Rosa	El Carmelo	Operación IQQ-AH	Alto Hospicio	Iquique	Operación IQQ-AH
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	27.606	26.915	<b>54.521</b>	42.835	80.930	<b>123.764</b>
1	2018	27.957	27.125	<b>55.082</b>	43.014	81.312	<b>124.326</b>
5	2022	29.452	27.950	<b>57.401</b>	43.777	82.868	<b>126.645</b>
10	2027	31.512	28.917	<b>60.430</b>	44.828	84.845	<b>129.673</b>
15	2032	33.872	29.818	<b>63.690</b>	46.031	86.902	<b>132.933</b>

### 7.3.2 Costos – Sistema Desincrustante Magnético, VOSGES (S.D.M.)

Se deben considerar los siguientes puntos:

- La presente estimación de costos, se realiza según los catálogos y el valor aproximado de dos equipos, entregados por el proveedor, por razones de confidencialidad.
- Si bien este sistema posee una desventaja de implementación, referente al tamaño de los Sólidos Suspendidos Totales (S.S.T.), y que estos no son controlados por normativa, para efectos del presente estudio se asume que el tratamiento logra abatir los efectos de la dureza en el agua. De esta forma, se determina que los S.S.T. del agua a tratar poseen un tamaño menor a 50 micras (por sobre el 90% de estos), por lo que no habría necesidad de realizar purgas de manera sistemática a los filtros previos a los aceleradores.
- Según el catálogo disponible, el modelo de mayor capacidad en cuanto a caudal, es de 45.000 [l/min], que equivale 750 [l/s]. Pero como en algunos puntos de tratamiento, los caudales a tratar son mayores que la máxima capacidad, se debe separar el caudal en más de un equipo, donde el costo estará incorporado dentro de la estimación de Obras Civiles, como se detalla más adelante.
- Debido a la necesidad de filtros de 50 micras, previos a los aceleradores iónicos, el Sistema Desincrustante Magnético hace referencia al trabajo en conjunto de estos equipos. Por esto, al momento de realizar las estimaciones de costos del S.D.M., se suman los costos de los aceleradores y filtros respectivos, facilitados por el proveedor.
- Para obtener una estimación más apropiada, se debe establecer alguna especie de alianza comercial o trato, obteniendo así los costos de cada modelo en particular, y que fueron retenidos por confidencialidad.

<sup>79</sup> Se vuelve a utilizar el costo de la energía de aproximadamente 100 pesos chilenos por [KWH] de consumo a diciembre 2018, y no la correspondiente al AT3, debido a los bajos consumos anuales de los equipos.

▸ CAPEX (Costos de Inversión):

Según el catálogo publicado [76] por la empresa VOSGES para su venta en todo el mundo, los equipos se clasifican por su capacidad de tratamiento y por la temperatura del agua que tratan. Así, para la línea de tratamiento de agua fría (temperatura menor a 35 [°C]), se diferencian equipos “Roscados”, con capacidades que van desde los 0,58 [l/s] a los 3,67 [l/s], y equipos denominados “Bridados”, de mayores capacidades de tratamiento, cubriendo caudales desde 7,5 [l/s] hasta 750 [l/s], tal y como muestra la *Tabla 7.10*<sup>80</sup>.

Tabla 7.10: Modelos, caudales máximos y diámetros, de los equipos S.D.M., presentados por VOSGES en sus catálogos.

Tipo	Modelo	Máxima Capacidad		Diámetro	
		[l/min]	[l/s]	["]	[mm]
Roscado	New Ara 2001	35	0,58	1/2	12,7
	New Ara 2002	60	1,00	3/4	19,05
	New Ara 2003	95	1,58	1	25,4
	New Ara 2004	140	2,33	1 1/4	31,75
	New Ara 2005	150	2,50	1 1/2	38,1
	New Ara 2006	220	3,67	2	50,8
Bridado	New Ara 2012	450	7,50	2	50,8
	New Ara 2013	550	9,17	3	76,2
	New Ara 2014	750	12,50	4	101,6
	New Ara 2015	1500	25,00	5	127
	New Ara 2016	2500	41,67	6	152,4
	New Ara 2018	3750	62,50	8	203,2

Dada la magnitud de los caudales de diseño, se necesitan equipos del tipo “Bridado”, los que si bien no están especificados en los catálogos publicados para caudales mayores a 62,5 [l/s], se pueden mandar a fabricar a pedido, según el proveedor, llegando a caudales de hasta 750 [l/s], y que poseen un diámetro de 28 [“]. Es por esto que, conocidos los diámetros y capacidades de caudal de los equipos “Bridados” de 8 y 28 [“], se realiza una estimación de las capacidades de los equipos a mandar a fabricar, según las consideraciones, el gráfico y la ecuación que se muestran en el ANEXO W; “Costos Sistema Desincrustante Magnético”.

A continuación, conociendo el valor del modelo “New Ara 2002”, y una aproximación del equipo más grande (de 28 [“] con capacidad de 750 [l/s]), en conjunto con los costos de sus filtros respectivos, facilitados por el proveedor y mostrados en la *Tabla 7.11* en pesos chilenos (al 31 de diciembre de 2018), es posible obtener una estimación de los costos de los otros sistemas.

<sup>80</sup> Cabe mencionar que, si bien se muestran los diámetros máximos de los equipos, esto es solo para tener una idea del tamaño de estos, ya que un análisis más recatado corresponde a una Ingeniería de Detalles, que se aleja del presente estudio.

Tabla 7.11: Características técnicas de y de costos, de ambos modelos de acelerador iónico con su filtro respectivo, en conjunto con la aproximación del costo de cada S.D.M.

Característica/Modelo	New Ara 2002	28 ["]	Unidad
Q Diseño	60	45000	[l/min]
	1,00	750,00	[l/s]
Diámetro	0,75	28	["]
	19,05	711,2	[mm]
Costo Acelerador	2.500	-	[USD] <sup>81</sup>
	-	350.000	[EUR] <sup>82</sup>
	\$ 1.704.975	\$ 278.561.500	[CLP]
Costo Filtro	825,83	120.000	[USD]
	\$ 563.207	\$ 81.838.800	[CLP]
<b>Costo S.D.M.</b>	<b>\$ 2.268.182</b>	<b>\$ 360.400.300</b>	<b>[CLP]</b>

Así, se aplica una relación lineal de los costos de los S.D.M. en función de las capacidades máximas de cada uno (caudal de diseño en [l/s]) para que, de forma equivalente con las estimaciones anteriores, estos costos se pasen a UF, obteniendo los valores referenciales de cada equipo de S.D.M. (C.E.), según la ecuación (7.2).

$$C.I._{C.E.} = 17,346 * Q_{\text{máximo}} + 64,937 \quad (7.2)$$

Por otra parte, además del costo del equipo, se asume un costo de instalación (C.Ins.) equivalente al 10% del costo del equipo, para todos los modelos (según información corroborada por el proveedor).

Adicionalmente, y utilizando el procedimiento y relaciones porcentuales anteriores, se determina que el costo de las obras y suministros complementarios, es 1,5 veces el costo del equipo y su instalación (resulta menor que para el S.A.E, al no considerar las Instalaciones Eléctricas).

Conocidos los caudales de diseño de cada alternativa y punto de aplicación, se obtienen los modelos de S.D.M. necesarios para abastecer la demanda de diseño, y así los CAPEX, que se muestran en detalle para cada alternativa en el ANEXO W; “Costos Sistema Desincrustante Magnético”, y de forma resumida en la *Tabla 7.12* a continuación.

<sup>81</sup> Valor del dólar [USD] al 31 de diciembre de 2018, equivalente a \$ 681,99 [CLP].

<sup>82</sup> Valor del euro [EUR] al 31 de diciembre de 2018, equivalente a \$ 795,89 [CLP].

Tabla 7.12: Resumen de los CAPEX, de la aplicación de PT de S.D.M., mediante distintos tipos de tratamiento.

Tipo de Tratamiento	Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	Inversión [UF]	
Centralizado	PTAP Santa Rosa	830	847	40.754	
	PTAP El Carmelo	680	681	32.675	
	<b>Total</b>			<b>73.429</b>	
Disperso	Alto Hospicio	AH+EB	235	269	12.998
		LT+ST+LN	94	97	4.800
		LP	86	97	4.800
	Iquique	CV1	402	406	19.557
		CV2	287	303	14.638
		CV3	252	269	12.998
		LD+H	121	131	6.439
		C+SS	33	42	2.166
		<b>Total</b>			<b>78.396</b>

La Capacidad Total de Tratamiento (C.T.T.), para el TC, se alcanza con 2 equipos, uno de 28 [“] y otro de 9 [“] (de 750 y 96,88 [l/s] de capacidad respectivamente) en la PTAP Santa Rosa, y en El Carmelo, con tan solo un equipo de 26 [“] y 681,25 [l/s] de capacidad.

Por otra parte, la C.T.T. en un TD, se logra con los modelos en los puntos a tratar, que se muestran a continuación:

- AH+EB: equipo de 14 [“] y 268,75 [l/s] de capacidad.
- LT+ST+LN y LP: equipo de 9 [“] y 96,88 [l/s] de capacidad.
- CV1: equipo de 18 [“] y 406,25 [l/s] de capacidad.
- CV2: equipo de 15 [“] y 303,13 [l/s] de capacidad.
- CV3: equipo de 14 [“] y 268,75 [l/s] de capacidad.
- LD+H: equipo de 10 [“] y 131,25 [l/s] de capacidad.
- C+SS: equipo “New Ara 2016”, de 41,67 [l/s] de capacidad.

▸ OPEX (Costos de Operación):

Tal y como se calculó anteriormente, referente a los OPEX de las empresas sanitarias, se utiliza el *Gráfico 11.13* y su correspondiente ecuación (11.27), para calcular los costos del S.D.M., debido a que se asume que la facturación será la misma.

Sin embargo, los valores obtenidos se aminoran debido a que, de las partidas que contemplan los OPEX, solo es necesario considerar las referentes a Materiales y Repuestos, Servicios de Laboratorio y Servicios de Operación y Mantenimiento, las que en su conjunto, según los estudios tarifarios de variadas empresas sanitarias, corresponden al 35% del costo total de operación, que se obtiene con la ecuación (11.27), determinando así los OPEX Snt. (OPEX, referente a las empresas Sanitarias).

Al no existir otro costo de operación importante en la estimación de implementación del S.D.M., los OPEX Snt. mostrados en la *Tabla 11.89* y la *Tabla 11.90* en el ANEXO V; “Costos Sistema Antical Electrónico” equivalen al costo de operación total, para cada alternativa, tal y como se presenta en la *Tabla 7.13*, de manera resumida.

Tabla 7.13: Resumen de los OPEX totales, según cada tipo de tratamiento en el Sistema IQQ-AH (columna Operación IQQ-AH es el total), dada la aplicación del Sistema Desincrustante Magnético.

Año	Año de estudio	Tratamiento Centralizado			Tratamiento Disperso		
		Santa Rosa	El Carmelo	Operación IQQ-AH	Alto Hospicio	Iquique	Operación IQQ-AH
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	27.606	26.914	54.520	42.834	80.929	123.763
1	2018	27.957	27.125	55.082	43.014	81.311	124.325
5	2022	29.451	27.950	57.401	43.776	82.868	126.644
10	2027	31.512	28.917	60.429	44.828	84.845	129.672
15	2032	33.871	29.818	63.689	46.031	86.902	132.932

## 7.4 RESUMEN DE COSTOS

Como consideración, se estima que para el año 0 solo habrá inversión, y que todas las etapas necesarias para la puesta en marcha de los distintos sistemas estarán completadas para el inicio del año 1 en estudio. Así, los OPEX de todas las alternativas, para el año 0, se anulan.

### 7.4.1 CAPEX de los tratamientos

En la *Tabla 7.14*, se muestra un resumen del Costo de Inversión Total (CAPEX Total) de cada tratamiento.

Tabla 7.14: Resumen del CAPEX Total de la aplicación de los distintos tipos de tratamientos, para cada una de las alternativas de aplicación dentro del Sistema IQQ-AH.

Tipo Tratamiento	CAPEX Total [UF]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	207.337	276.767
Nanofiltración	1.832.369	1.932.820
Intercambio Iónico	1.544.055	1.576.632
Sistema Antical Electrónico	20.651	21.158
Sistema Desincrustante Magnético	73.429	78.396

### 7.4.2 OPEX de los tratamientos

De igual forma, conocidos los OPEX anuales, para cada sistema de tratamiento y alternativa de aplicación, se presenta el resumen del Costo de Operación Total (OPEX T.) de cada tratamiento, mostrado por la *Tabla 7.15* y la *Tabla 7.16*, en los años 0, 1, 5, 10 y 15 del horizonte de diseño.

Tabla 7.15: Resumen del OPEX T. de la aplicación de los distintos tipos de tratamientos, como TC dentro del Sistema IQQ-AH.

Año	Año de estudio	Costo de Operación Total [UF] – T. Centralizado				
		P. Cal	Nanofiltración	Int. Iónico	S.A.E.	S.D.M.
0	2017	0	0	0	0	0
1	2018	302.584	130.201	497.801	55.082	55.082
5	2022	320.329	139.520	535.021	57.401	57.401
10	2027	343.510	151.697	583.975	60.430	60.429
15	2032	368.479	164.372	637.010	63.690	63.689

Tabla 7.16: Resumen del OPEX T. de la aplicación de los distintos tipos de tratamientos, como TD dentro del Sistema IQQ-AH.

Año	Año de estudio	Costo de Operación Total [UF] – T. Disperso				
		P. Cal	Nanofiltración	Int. Iónico	S.A.E.	S.D.M.
0	2017	0	0	0	0	0
1	2018	476.952	136.024	498.192	124.326	124.325
5	2022	494.654	145.307	535.287	126.645	126.644
10	2027	517.762	157.423	584.029	129.673	129.672
15	2032	542.629	170.013	636.771	132.933	132.932

### 7.4.3 Anualidad de la Inversión

Con el fin de relacionar de mejor manera los costos de inversión y operación, a cada componente de la inversión<sup>83</sup>, que se asumen invertidos en el año 0, se les calcula su valor anual de costo (anualidad, A) mediante la ecuación (7.3), para luego obtener la anualidad total de cada tratamiento mediante la suma mostrada por la ecuación (7.4), las que se explican a continuación.

$$A_i = CAPEX_i * \frac{t * (1 + t)^n}{(1 + t)^n - 1} \quad (7.3)$$

$$A_{total\ tratamiento} = \sum A_i \quad (7.4)$$

- $A_i$  = valor anual del costo o anualidad de la inversión, de cada componente “i” de esta.
- $CAPEX_i$  = valor presente o costo de la inversión, de cada componente “i” de esta.
- $t$  = tasa de costo de capital, tasa de interés o de retorno, donde según los procesos tarifarios de la SISS es del 7%.
- $n$  = número de períodos desde el año 0, en este caso referente a la vida útil de cada componente de la inversión, mostrada por la *Tabla 7.18*.

A continuación, y según los criterios adoptados por la actualización del último estudio tarifario de Aguas del Altiplano, se presentan las vidas útiles técnicas teóricas, según cada tratamiento, en la *Tabla 7.17*, y se realiza previamente la siguiente definición:

Vida Útil Técnica (V.U.T.): se adopta el valor máximo recomendado (salvo particularidades, que se detallan a continuación), compatible con infraestructura en operación en algunas empresas sanitarias chilenas. Los valores adoptados en el presente estudio se presentan en la *Tabla 7.18*.

<sup>83</sup> Obras Civiles, Tuberías y Accesorios, Equipos Electromecánicos e Instalaciones Eléctricas.

Tabla 7.17: Vida útil técnica (teórica), recomendada para PTAP, según Anexo “Vidas útiles” del estudio tarifario ADA.

Variable	Años
Obras Civiles (O.C., hormigón)	90
Tuberías y Accesorios (T.A.)	50
Equipos Electromecánicos (E.E.)	20
Instalaciones Eléctricas (I.E.)	20

Tabla 7.18: Vida útil técnica adoptada, para calcular la anualidad de cada tratamiento en estudio.

Variable	V.U.T. [año]				
	P. Cal	Nanofiltración	Int. Iónico	S.A.E.	S.D.M.
Obras Civiles (O.C.)	90	90	90	90	90
Tuberías y Accesorios (T.A.)	50	50	50	50	50
Equipos Electromecánicos (E.E.)	20	10 <sup>84</sup>	20	30 <sup>85</sup>	30 <sup>86</sup>
Instalaciones Eléctricas (I.E.)	20	20	20	20	-

Recordar que, para el caso particular del Intercambio Iónico, se utilizan los porcentajes presentados en el ANEXO T; “CAPEX; Intercambio Iónico” para aplicarlos a los valores de “Sub-total” mostrados por la *Tabla 11.60* y la *Tabla 11.61*, obteniendo así lo presentado en el ANEXO X; “Valorización de CAPEX para Intercambio Iónico”, a los que se les calcula la anualidad.

Utilizando la ecuación (7.3) y (7.4), es posible determinar las anualidades de las inversiones (en adelante, A.In.) de cada tratamiento y alternativa, tal y como muestra la *Tabla 7.19* (El detalle de los costos anualizados de cada alternativa, se presenta en el ANEXO Y; “CAPEX Anualizados; Todos los tratamientos”).

Tabla 7.19: Anualidades de las inversiones de cada tipo de tratamiento en estudio.

Tipo Tratamiento	Anualidad Inversión Total [UF/año]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	16.065	21.258
Nanofiltración	238.565	249.821
Intercambio Iónico	133.407	137.315
Sistema Antical Electrónico	1.570	1.609
Sistema Desincrustante Magnético	5.482	5.853

► **Factor de Anualidad:**

Para facilitar el análisis, en la *Tabla 7.20*, se presentan las inversiones, anualidades y un “Factor de Anualidad” (F.A.) como porcentaje, referente a la división entre las anualidades y su respectiva inversión, y que se utiliza más adelante para el impacto tarifario.

<sup>84</sup> Se considera la mitad de lo recomendado por la *Tabla 7.17*, para considerar el gran riesgo de falla de los equipos de bombeo, dadas las características abrasivas de las aguas del norte.

<sup>85</sup> La garantía del S.A.E., respaldada por el proveedor, es de 30 años.

<sup>86</sup> Debido al supuesto de la existencia del filtro en el S.D.M., el proveedor señala garantía de por vida, sin embargo, y por razones comerciales, se limita de forma conservadora a 30 años.

Tabla 7.20: CAPEX, costos anualizados y factores de anualidad, de la aplicación de los distintos tratamientos, tanto como TC y TD.

Tipo Tratamiento	Tratamiento Centralizado			Tratamiento Disperso		
	CAPEX	A.In.	F.A.	CAPEX	A.In.	F.A.
	[UF]	[UF/año]	[%]	[UF]	[UF/año]	[%]
Precipitación con Cal	207.337	16.065	7,75%	276.767	21.258	7,68%
Nanofiltración	1.832.369	238.565	13,02%	1.932.820	249.821	12,93%
Intercambio Iónico	1.544.055	133.407	8,64%	1.576.632	137.315	8,71%
Sistema Antical Electrónico	20.651	1.570	7,60%	21.158	1.609	7,60%
Sistema Desincrustante Magnético	73.429	5.482	7,47%	78.396	5.853	7,47%

#### 7.4.4 Anualidad de la Operación

A continuación, de manera similar al procedimiento de cálculo de la anualidad de las inversiones presentadas, es necesario traer a valor presente los costos operacionales durante los 15 años del horizonte de diseño para cada alternativa, obteniendo una anualidad del OPEX. Es por esto que se utiliza el Valor Actual de los Costos, según la ecuación (7.5) genérica, para traer a valor presente costos operacionales anuales en el tiempo, en forma de anualidad.

$$VAC = \left( \sum_{i=1}^n \frac{Costo_{año\ i}}{(1+t)^i} \right) * \left( \frac{(1+t)^n * t}{(1+t)^n - 1} \right) \quad (7.5)$$

- VAC = Valor Actual de Costos.
- n = número de períodos, que para el caso del presente estudio corresponden a años transcurridos desde el año 0.
- Costo<sub>año i</sub> = Costo durante el período “i”.
- t = tasa de costo de capital, tasa de interés o de retorno.

Sabiendo que los costos a analizar corresponden a los costos operacionales anuales totales, de cada alternativa durante 15 años, la ecuación (7.5) queda como se muestra en la ecuación (7.6), para calcular el VAC de los OPEX (en adelante, Anualidad de la Operación o A.Op.).

$$Anualidad\ OPEX = VAC_{OPEX_r} = \left( \sum_{i=1}^{15} \frac{OPEX_{año\ i}}{(1+t)^i} \right) * \left( \frac{(1+t)^{15} * t}{(1+t)^{15} - 1} \right) \quad (7.6)$$

- VAC<sub>OPEX\_r</sub> = valor presente del costo de operación del tratamiento “r”, durante los 15 años del horizonte de diseño.
- OPEX<sub>año i</sub> = costo de operación durante el año “i”.
- t = tasa de costo de capital, tasa de interés o de retorno, del 7% tal y como se menciona anteriormente.

Utilizando la ecuación anterior, se calculan las anualidades de operación para cada tratamiento, presentados en la Tabla 7.21.

Tabla 7.21: Anualidad de la Operación, para cada tipo de tratamiento en estudio.

Tipo Tratamiento	Anualidad Operación Total [UF/año]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	328.920	503.214
Nanofiltración	143.935	149.696
Intercambio Iónico	553.224	553.399
Sistema Antical Electrónico	58.523	127.767
Sistema Desincrustante Magnético	58.523	127.766

#### 7.4.5 Costos Totales a Largo Plazo Neto, Reales (CTLPN\_R)

Obtenidas las anualidades del CAPEX mostradas en la *Tabla 7.19*, y las del OPEX en la *Tabla 7.21*, es posible determinar una aproximación de los Costos Totales a Largo Plazo Netos Reales (CTLPN\_R), según la ecuación (7.7), cuyos valores se presentan en la *Tabla 7.22* (explicación en detalle en el ANEXO Z; “Costo Total a Largo Plazo Teórico”).

$$CTLPN_R \approx \text{Anualidad Inversión} + \text{Anualidad Operación} \quad (7.7)$$

Tabla 7.22: Costo Total a Largo Plazo Neto, para cada tipo de tratamiento en estudio.

Tipo Tratamiento	CTLPN_R [UF/año]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	344.986	524.472
Nanofiltración	382.500	399.517
Intercambio Iónico	686.631	690.714
Sistema Antical Electrónico	60.094	129.376
Sistema Desincrustante Magnético	64.004	133.618

Se observa de la tabla anterior, que los Tratamientos No Convencionales son una alternativa mucho más conveniente económicamente que los Convencionales, para tratar los efectos de las aguas duras en el norte de Chile. Por otra parte, el más costoso resulta ser el Intercambio Iónico, llegando incluso a superar en 10 veces los costos de los tratamientos No Convencionales, dada su aplicación como Tratamiento Centralizado.

En la *Gráfico 7.1*, se muestran los porcentajes respectivos a la componente de costo de inversión y operación, para cada alternativa, y tener así una idea del origen de cada costo.

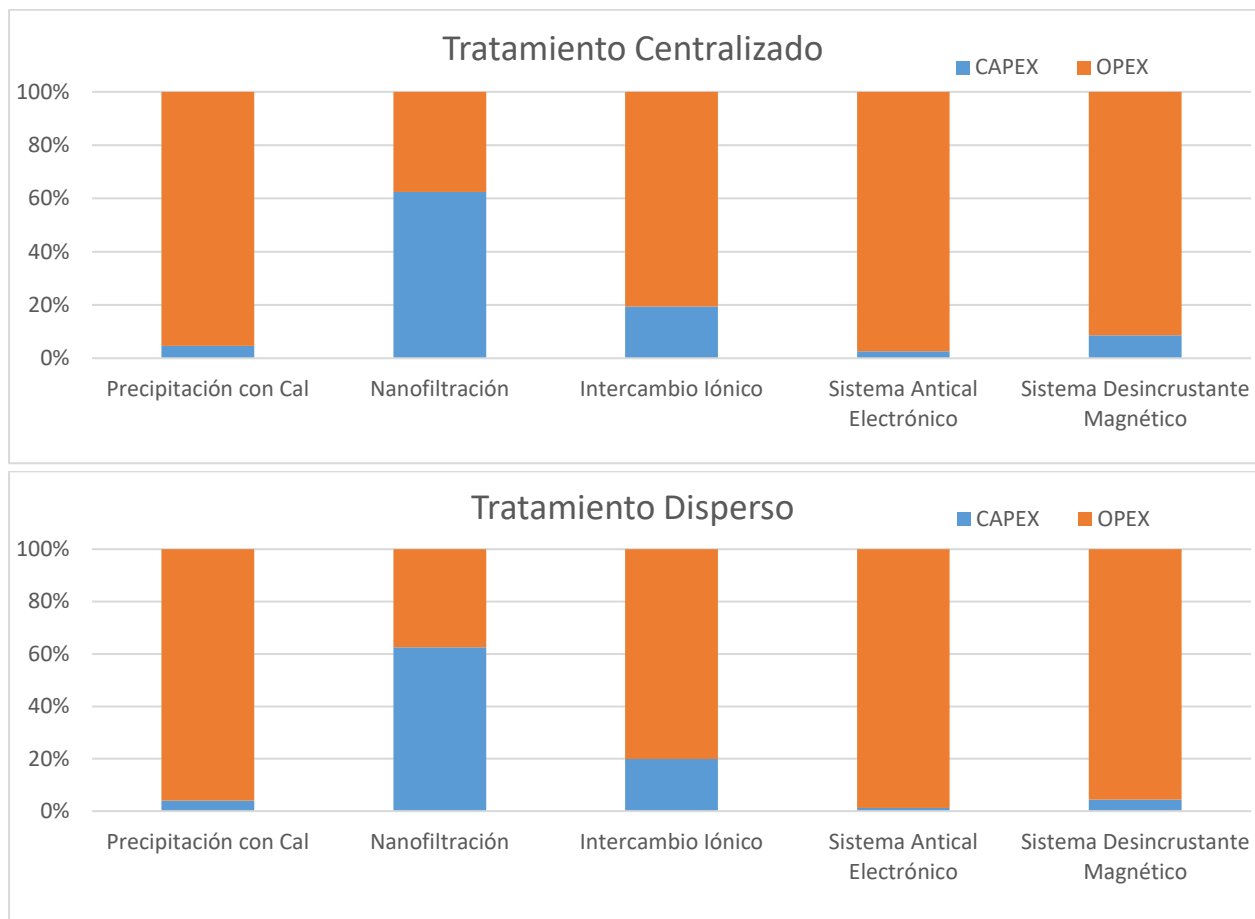


Gráfico 7.1: Peso porcentual del CAPEX y OPEX, respecto al CTLPN para cada tratamiento y forma de aplicación en estudio.

Se observa que, para casi todos los casos de tratamiento, la principal componente del costo total son los operativos, durante los 15 años del horizonte. La Nanofiltración se escapa de dicha relación, debido al fuerte componente de inversión inicial, referido a los costos de los Equipos Electromecánicos, siendo principalmente las bombas de gran capacidad.

## 7.5 ESTIMACIÓN DEL EVENTUAL IMPACTO TARIFARIO

Obtenidos los valores de los CTLPN\_R, equivalentes a la estimación del costo para la empresa sanitaria, de la implementación de cada uno de los tratamientos abatidores de los efectos de la dureza en el agua potable del norte de Chile, para un horizonte de diseño de 15 años, se hace necesario determinar el costo medio de la “Empresa Modelo” (costo medio modelo, CTLPN\_M).

Por la normativa chilena actual para determinación de tarifas, el CTLPN\_M estima los costos que son pagados por los clientes, dada su incorporación en el cálculo del costo de la tarifa, implicando así un aumento tarifario. De esta forma, los costos de la “Empresa Modelo” se dimensionan con caudales menores, debido a que en el cálculo se asumen menores pérdidas, por lo que la tarifa obtenida cubre solo una parte de los costos totales que enfrenta la empresa real.

Conocido el costo medio de la “Empresa Modelo”, se estiman aumentos de tarifas debido a cada una de las implementaciones de los tratamientos en estudio, según las bases de los estudios tarifarios realizados por la SISS, acordes a la normativa actual, para la determinación de las tarifas.

### 7.5.1 Supuestos y consideraciones generales

- En el capítulo anterior se ha hecho un análisis preliminar, haciendo una recomendación técnica al obtener el tratamiento más eficiente, por lo que la evaluación de una “Empresa Modelo” debería centrarse en aquel tratamiento (metodología de los estudios tarifarios). Sin embargo, en el ejercicio se modelan todos los sistemas para cubrir los factores que no se analizan en detalle, como los del tipo ambiental, social, impactos por la infraestructura, logística, inconvenientes particulares, o de otra índole que pudieran viabilizar o impedir el desarrollo de los distintos tipos de tratamiento estudiados y su configuración (centralizada o dispersa).
- El horizonte de evaluación de la implementación de los tratamientos en la “Empresa Modelo” (equivalente al horizonte de diseño, para la estimación real de costos), es de 35 años.
- Para determinar los CTLPN\_M, se realiza el mismo procedimiento que para calcular los CTLPN\_R, pero con diferencias en los caudales a tratar y en los años a considerar para obtener el valor presente de los costos anuales de operación, detallados más adelante.
- En términos generales, la metodología de trabajo consiste en analizar los datos y realizar cálculos, tal como señalan las Bases de los estudios tarifarios, pero de manera más simplificada, dada la característica de Diseño Conceptual del presente estudio.

### 7.5.2 Metodología

Un cálculo aproximado y genérico para estimar la tarifa media de AP asociada al tratamiento “r” (utilizando como base el procedimiento administrativo para la determinación de fórmulas tarifarias de la ley chilena [88]), es el que se presenta en la ecuación (7.8), sabiendo que esta paga los costos y gastos, más la anualidad equivalente de su flujo de inversiones y reinversiones, descontando las obras que han sido financiadas por terceros [89], y que utiliza la demanda “promedio” ( $Q^*$ , explicada más adelante).

$$Tarifa\ Media_r \approx \frac{CTLPN_{M_r}}{Q^*} \quad (7.8)$$

- $CTLPN_{M_r}$  = Costo Total a Largo Plazo Neto, asociado al tratamiento “r”, según la estimación de costos de la “Empresa Modelo”.
- $Q^*$  = Demanda anual actualizada o equivalente, que corresponde a una demanda promedio según la proyección de facturación dentro de un período y localidad particular, que en este caso son 5 años, dada la duración de la tarifa.

Si bien la ecuación presentada por definición, contempla todos los costos de los cuatro procesos sanitarios, para el caso de este estudio, las tarifas contemplan solo los costos asociados a

los tratamientos, obteniendo directamente el costo como un Aumento Tarifario (AT), del cobro por metro cúbico consumido por cliente, significando un aumento en la cuenta mensual de AP.

Por otra parte, para calcular la estimación de los costos de la “Empresa Modelo”, es necesario obtener los caudales a tratar, según las consideraciones que contemplan los estudios tarifarios, que asumen porcentajes de pérdidas de distribución y horizonte de evaluación (diseño) distintos a los presentados anteriormente, tal y como se presentan a continuación.

### 7.5.3 Caudal de distribución – Sistema IQQ-AH, “Empresa Modelo”

Al no existir una variación, respecto a lo presentado anteriormente, en cuanto a las características propias de cada localidad, alternativa de implementación y comportamiento de las proyecciones de consumo, las proyecciones de demanda son iguales a las ya presentadas, pero varían los porcentajes de pérdidas considerados para determinar los caudales de diseño.

▸ Proyección de Demanda:

La proyección de los caudales, tanto medios como máximos diarios, de consumo de cada localidad, ya están determinados y son los mostrados por la Tabla 11.13 y la Tabla 11.15 respectivamente (presentes en el ANEXO M; “Proyección de Demanda”), cuyos valores pertinentes al presente apartado son hasta el “año 5” de estudio, es decir entre 2017 y 2022.

▸ Pérdidas:

La pérdida a considerar para ambas localidades es del 15% en la distribución, dados los niveles de pérdidas eficientes de la empresa modelo, según las BET preliminares de ADA [86], que define esta pérdida como máxima.

▸ Caudal Total de Distribución Sistema IQQ-AH:

Siguiendo el mismo procedimiento del capítulo anterior, se determinan los caudales de distribución, asociados a los caudales máximos diarios de consumo, según la ecuación (6.4). Así, en la Tabla 7.23, se presentan los caudales totales de distribución.

Tabla 7.23: Caudales máximos diarios de distribución, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referente a los 5 años de proyección.

Año	Año de estudio	Caudal Máximo Diario de Distribución		Caudal Total de Distribución Salir desde las PTAP
		Iquique	Alto Hospicio	Sistema IQQ-AH
		[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	671	230	901
1	2018	682	235	917
2	2019	693	240	933
3	2020	704	246	950
4	2021	716	251	967
5	2022	727	257	984

Para determinar los caudales a tratar (diseño), se realiza un procedimiento distinto al realizado en la estimación “real”, ya que se calcula el valor presente del caudal de diseño, durante los 5 años del horizonte de diseño, constantes durante los 35 años del horizonte de evaluación.

Con un horizonte de diseño de 5 años (pero con el supuesto de su utilización para los 35 años del horizonte de evaluación, siguiendo la metodología de los estudios tarifarios), las plantas a diseñar deben ser capaces de tratar al menos los caudales anualizados, según la ecuación (7.9), la que homologa los costos anuales con caudales anuales, entre los años 2018 y 2022.

$$VAC_{Q_M} = Q_M = \left( \sum_{i=1}^5 \frac{Q_{\text{año } i}}{(1+t)^i} \right) * \left( \frac{(1+t)^5 * t}{(1+t)^5 - 1} \right) \quad (7.9)$$

- $Q_M$  = valor presente del caudal de diseño, durante los 5 años del horizonte de diseño, constantes durante los 35 años del horizonte de evaluación.
- $Q_{\text{año } i}$  = caudal a tratar durante el año “i”.
- $t$  = tasa de costo de capital, tasa de interés o de retorno, del 7% tal y como se menciona anteriormente.

Así, los caudales de distribución de la empresa modelo, por cada localidad y para el sistema IQQ-AH, son los que presenta la *Tabla 7.24*.

Tabla 7.24: Comparación entre los caudales de distribución para el caso de una estimación “real”, y una “modelo”.

Localidad	Estimación "Empresa Real"		Estimación "Empresa Modelo"	
	Pérdida [%]	Caudal Máximo Diario de Distribución [l/s]	Pérdida [%]	Caudal Máximo Diario de Distribución [l/s]
Iquique	34,69%	1095	15,00%	702
Alto Hospicio	34,69%	415	15,00%	246
Sistema IQQ-AH	34,69%	1510	15,00%	948

Adicionalmente, la tabla anterior muestra los porcentajes de pérdida de distribución y los caudales de distribución ya obtenidos para la estimación “real”, dando cuenta que el caudal total a distribuir disminuye poco más de un 37%, para el análisis de la empresa modelo.

#### 7.5.4 Caudal a Tratar – No Convencional – T. Centralizado, “Empresa Modelo”

Como se mencionó anteriormente, esta alternativa contempla la aplicación de los Tratamientos No Convencionales inmediatamente aguas abajo de las PTAP existentes, por lo que se deben determinar los caudales máximos diarios de distribución, que se deben tratar en las PT.

Así, para el caso de la **PTAP Santa Rosa**, la cual abastece a toda la demanda de Alto Hospicio, y que con la misma cantidad de agua aporta al sistema de Iquique (según el supuesto obtenido del estudio para el Balance Oferta-Demanda vigente de Alto Hospicio), los caudales correspondientes de la planta, según los porcentajes ya presentados por la *Tabla 6.10*, se muestran en la *Tabla 7.25*.

Tabla 7.25: Aportes de la PTAP Santa Rosa, a los sistemas de Iquique y Alto Hospicio, especificando los caudales totales, a la salida y entrada de la planta, y también los caudales perdidos, tratados y no tratados.

Año	Año de estudio	Aporte de PTAP Santa Rosa		PTAP Santa Rosa					
		Iquique	Alto Hospicio	Entrada	A Tratar	No Tratado	Tratado	Pérdidas	Salida
		[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	230	230	481	409	72	388	20	460
1	2018	235	235	492	418	74	397	21	470
2	2019	240	240	502	427	75	406	21	480
3	2020	246	246	513	436	77	415	22	492
4	2021	251	251	525	446	79	424	22	502
5	2022	257	257	536	456	80	433	23	513

Así, los caudales anuales a tratar, aguas abajo de la PTAP Santa Rosa, serán los correspondientes a la columna “Salida”, de la *Tabla 7.25*.

Por otra parte, sabiendo que la **PTAP El Carmelo** es la encargada de tratar el resto del agua demandada por Iquique, y que no es aportada por la PTAP Santa Rosa, se obtiene el caudal tratado por la planta. A continuación, en la *Tabla 7.26*, se muestra el aporte de cada una de las PTAP, y los caudales máximos diarios de distribución, con los cuales se abastece la demanda de Iquique.

Tabla 7.26: Aporte de caudal de cada una de las PTAP que abastecen al sistema de Iquique, y dicha demanda particular, como caudal máximo diario de distribución, para cada uno de los años del horizonte de diseño.

Año	Año de estudio	Aporte de PTAP		Iquique
		Santa Rosa	El Carmelo	Qdistribución
		[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	230	441	671
1	2018	235	447	682
2	2019	240	453	693
3	2020	246	459	705
4	2021	251	465	716
5	2022	257	470	727

A continuación, mediante la ecuación (7.9) se determina el valor presente de los caudales de cada planta de tratamiento, obteniendo así los caudales de diseño “modelo” (se presentan más adelante en la *Tabla 7.29*).

### 7.5.5 Caudal a Tratar – No Convencional – T. Disperso, “Empresa Modelo”

Teniendo los caudales a tratar, tanto para Iquique como para Alto Hospicio, presentados en la *Tabla 7.24*, se pueden determinar los caudales a tratar en cada uno de los puntos de aplicación. A continuación, en la *Tabla 7.27* y la *Tabla 7.28*, se presentan dichos caudales a tratar en el horizonte de diseño, para Iquique y Alto Hospicio, respectivamente.

Tabla 7.27: Caudales a tratar por sector de Iquique, para un Tratamiento Centralizado.

Año	Año de estudio	Iquique	Caudal a Tratar por Sector				
			Qt-CV1	Qt-CV2	Qt-CV3	Qt-LD+H	Qt-C+SS
		[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	670	246	176	154	74	20
1	2018	682	250	179	157	75	21
2	2019	694	255	182	159	77	21
3	2020	705	259	185	162	78	21
4	2021	716	263	188	164	79	22
5	2022	727	267	191	167	80	22

Tabla 7.28: Caudales a tratar por sector de Alto Hospicio, para un Tratamiento Disperso.

Año	Año de estudio	Alto Hospicio	Caudal a Tratar por Sector		
			Qt-AH+EB	Qt-LT+ST+LN	Qt-LP
		[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	230	131	52	47
1	2018	235	133	53	49
2	2019	241	136	55	50
3	2020	246	139	56	51
4	2021	251	142	57	52
5	2022	257	146	58	53

Finalmente, y debido al procedimiento mencionado para obtener los caudales  $Q_M$ , según la ecuación (7.9), los caudales de diseño para estimar la magnitud de las PT No Convencionales, en cada uno de los puntos presentados en la *Figura 6.2*, son los que muestra la *Tabla 7.29*.

A continuación, y de forma equivalente a lo realizado en los apartados anteriores, una vez determinados los caudales totales a tratar, para cada una de las alternativas, se determinan los porcentajes de caudales a tratar para aquellos tratamientos que eliminan la dureza, según el porcentaje de tratamiento respectivo, con el fin de alcanzar la dureza objetivo presentada en el apartado 3.3, luego de realizar una mezcla con el agua no tratada.

### 7.5.6 Caudal a Tratar – Convencional – T. Centralizado, “Empresa Modelo”

Siguiendo el mismo procedimiento mostrado en el apartado 6.4.3, utilizando los mismos porcentajes de tratamiento, pero con los caudales respectivos a la empresa modelo, se obtiene la proyección de caudales a tratar. Luego, y debido a que las plantas a diseñar deben ser capaces de tratar al menos el caudal anualizado, para los primeros 5 años proyectados, se desarrolla la ecuación (7.9) obteniendo los caudales de diseño respectivos, y que se muestran en la *Tabla 7.29*.

### 7.5.7 Caudal a Tratar – Convencional – T. Disperso, “Empresa Modelo”

Manteniendo el procedimiento anterior, los caudales de diseño para estimar la magnitud de las PT Convencionales, en cada uno de los puntos presentados en la *Figura 6.2*, son los que muestra la *Tabla 7.29*.

### 7.5.8 Resumen de Caudales de Diseño

Finalmente, a modo de síntesis, en la *Tabla 7.29* se presentan todos los caudales de diseño obtenidos, tanto para una estimación “real”, como para una “modelo”.

Tabla 7.29: Resumen de los caudales de diseño, determinados para la valorización de costos de los tratamientos.

Tipo de Tratamiento	Punto a Tratar	T. Convencional		T. No Convencional		
		Q Diseño "Real" [l/s]	Q Diseño "Modelo" [l/s]	Q Diseño "Real" [l/s]	Q Diseño "Modelo" [l/s]	
Centralizado	PTAP Santa Rosa	595	351	830	490	
	PTAP El Carmelo	471	317	680	458	
Disperso	Iquique	CV1	284	182	402	258
		CV2	203	130	287	184
		CV3	177	114	252	161
		LD+H	85	55	121	78
		C+SS	23	15	33	21
	Alto Hospicio	AH+EB	166	98	235	139
		LT+ST+LN	66	39	94	56
		LP	60	36	86	51

### 7.5.9 Resumen de Costos “Empresa Modelo”

Homologando el procedimiento realizado para determinar los costos “Reales”, se estima que para el año 0 solo habrá inversión, y que todas las etapas necesarias para la puesta en marcha de los distintos sistemas estarán completadas para el inicio del año 1 en estudio. Así, los OPEX de todas las alternativas, para el año 0, tienen costo nulo.

Además, se utilizan las mismas bases de datos y supuestos realizados durante los apartados 7.2 y 7.3, cuyos resultados en detalle se presentan en el capítulo 11 Anexos (ANEXO AA; “CAPEX de Empresa Modelo” y ANEXO AB; “OPEX de Empresa Modelo”). A continuación, en la *Tabla 7.30* se presenta el resumen de los CAPEX, y en la *Tabla 7.31* y *Tabla 7.32* el resumen de los OPEX, respectivos para cada alternativa de aplicación.

#### ▸ CAPEX, “Empresa Modelo” (CAPEX M.):

Tabla 7.30: Resumen del CAPEX M. Total de aplicación de los distintos tipos de tratamientos, para cada alternativa de aplicación.

Tipo Tratamiento	CAPEX M. Total [UF]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	138.671	208.277
Nanofiltración	1.161.756	1.263.915
Intercambio Iónico	1.122.839	1.154.729
Sistema Antical Electrónico	12.456	13.214
Sistema Desincrustante Magnético	46.151	50.084

► OPEX, “Empresa Modelo” (OPEX M.):

Tabla 7.31: Resumen del OPEX M. Total de la aplicación de los tratamientos, para un TC dentro del Sistema IQQ-AH.

Año	Año de estudio	OPEX M. Total [UF] – T. Centralizado				
		P. Cal	Nanofiltración	Int. Iónico	S.A.E.	S.D.M.
0	2017	0	0	0	0	0
1	2018	267.234	100.477	379.453	55.082	55.082
2	2019	270.968	102.238	386.476	55.653	55.652
3	2020	275.336	104.019	394.587	56.320	56.320
4	2021	278.557	105.819	400.789	56.812	56.812
5	2022	282.411	107.637	408.078	57.401	57.401

Tabla 7.32: Resumen del OPEX M. Total de la aplicación de los tratamientos, para un TD dentro del Sistema IQQ-AH.

Año	Año de estudio	OPEX M. Total [UF] – T. Disperso				
		P. Cal	Nanofiltración	Int. Iónico	S.A.E.	S.D.M.
0	2017	0	0	0	0	0
1	2018	441.583	106.284	379.541	124.326	124.325
2	2019	445.309	108.039	386.542	124.897	124.895
3	2020	449.670	109.813	394.631	125.564	125.563
4	2021	452.882	111.606	400.808	126.056	126.055
5	2022	456.728	113.417	408.070	126.645	126.644

► Anualidad de la Inversión, “Empresa Modelo”:

Utilizando los CAPEX M y los factores de anualidad, calculados anteriormente para una empresa “real” (Tabla 7.20), se determinan las anualidades de las inversiones de los tratamientos, como el producto entre ambas variables, obteniendo lo mostrado por la Tabla 7.33.

Tabla 7.33: Anualidades de las inversiones de cada tipo de tratamiento en estudio.

Tipo Tratamiento	Anualidad Inversión Total [UF/año]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	10.745	15.997
Nanofiltración	151.254	163.364
Intercambio Iónico	97.013	100.570
Sistema Antical Electrónico	947	1.005
Sistema Desincrustante Magnético	3.445	3.739

► Anualidad de la Operación, “Empresa Modelo”:

Utilizando la ecuación (7.5) (pero para los primeros 5 años del horizonte de evaluación), se determinan las anualidades de operación para cada tratamiento, presentados en la Tabla 7.34.

Tabla 7.34: Anualidades de los OPEX, para cada tipo de tratamiento en estudio, dada su aplicación por una “Empresa Modelo”.

Tipo Tratamiento	Anualidad Operación Total [UF/año]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	274.388	448.723
Nanofiltración	103.796	109.591
Intercambio Iónico	392.910	392.954
Sistema Antical Electrónico	56.175	125.419
Sistema Desincrustante Magnético	56.175	125.418

▸ Costo Total a Largo Plazo Neto, “Empresa Modelo” (CTLPN\_M):

Sabiendo que las anualidades, tanto de inversión como de operación presentadas, es posible determinar una aproximación de los Costos Totales a Largo Plazo Netos Modelo (CTLPN\_M), como la suma de ambas anualidades, obteniendo lo presentado en la *Tabla 7.35*.

Tabla 7.35: CTLPN\_M para cada tipo de tratamiento en estudio, dada su aplicación por un “Empresa Modelo”.

Tipo Tratamiento	CTLPN_M [UF/año]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	285.133	464.720
Nanofiltración	255.051	272.955
Intercambio Iónico	489.923	493.524
Sistema Antical Electrónico	57.122	126.424
Sistema Desincrustante Magnético	59.620	129.157

De la tabla anterior, se observa nuevamente que los tratamientos No Convencionales son una alternativa mucho más barata que los Convencionales, y que además el más costoso sigue siendo el tratamiento por Intercambio Iónico, independiente de su alternativa de aplicación.

Finalmente, se muestran en el *Gráfico 7.2*, los porcentajes respectivos a la componente de costo de inversión y operación, para cada alternativa, y tener así una idea del origen de cada costo.

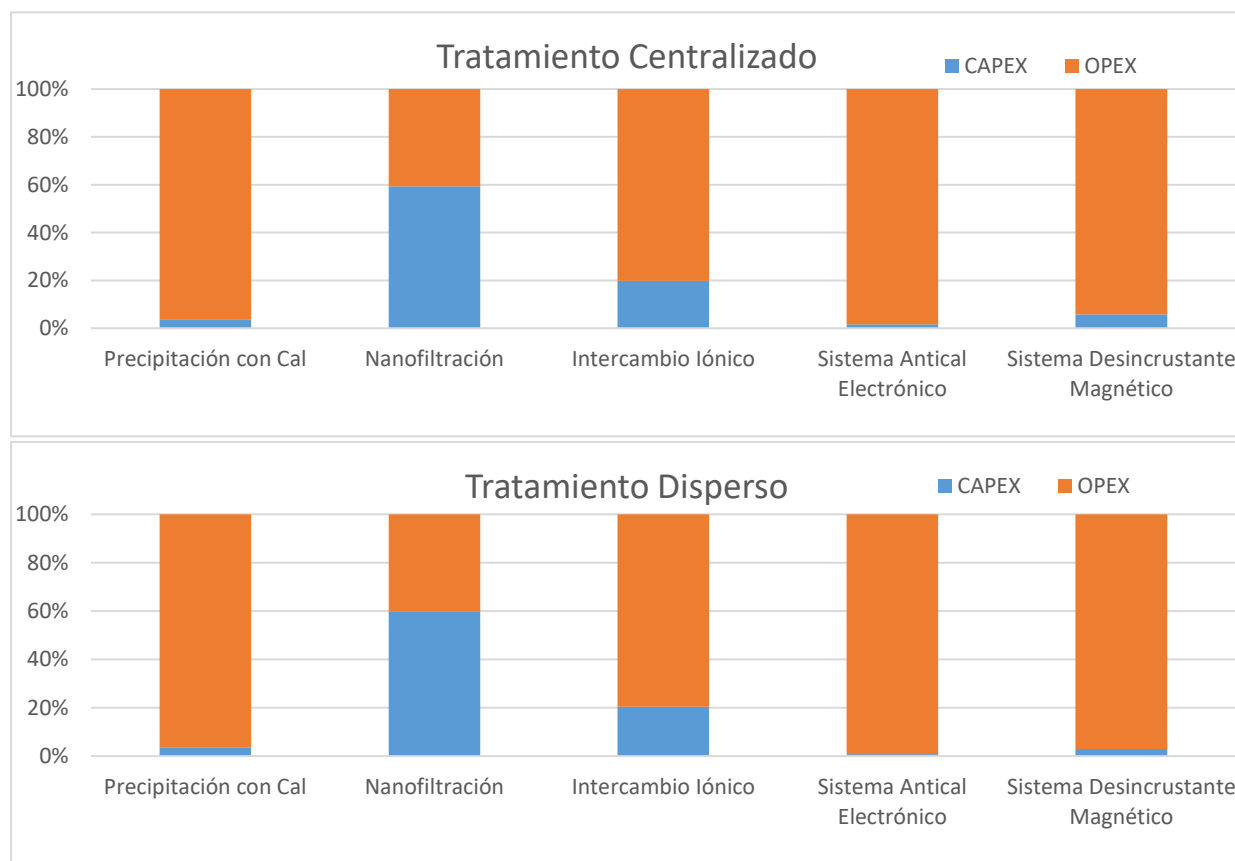


Gráfico 7.2: Peso porcentual del CAPEX y OPEX, respecto al CTLPN para cada tratamiento y forma de aplicación en estudio, según una empresa “modelo”.

Se observa que, para casi todos los casos de tratamiento, la principal componente del costo total son los OPEX, durante los primeros 5 años del horizonte de evaluación. Por otra parte, la Nanofiltración se vuelve a escapar de dicha relación, debido al fuerte componente de inversión inicial, referido a los costos de los Equipos Electromecánicos, siendo principalmente las bombas de gran capacidad, necesarias para el tratamiento.

#### 7.5.10 Variación Tarifaria (VT)

Tal y como muestra el ANEXO AC; “Determinación de la Demanda Anual Actualizada Q\*”, con los valores de facturación media total determinados en la *Tabla 11.125* y utilizando la ecuación (11.43), se obtiene una Demanda Anual Actualizada **Q\* de 21.639 [Mm<sup>3</sup>]**.

Obtenidos los CTLPN\_M y el Q\*, es posible determinar la Tarifa Media aproximada o Variación Tarifaria según la ecuación (7.8), cuyos resultados se presentan en la *Tabla 7.36*, para cada alternativa de tratamiento en particular (valores en pesos chilenos, determinados según el valor de la UF al 31 de diciembre 2018, de 27.565,79 [CLP]).

Tabla 7.36: VT estimados, dada la aplicación de los distintos tratamientos en estudio, según 2 alternativas de aplicación.

Tipo Tratamiento	Variación Tarifaria [UF/m <sup>3</sup> ]		Variación Tarifaria [CLP/m <sup>3</sup> ]	
	T. Centralizado	T. Disperso	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	0,0132	0,0215	\$ 363,2	\$ 592,0
Nanofiltración	0,0118	0,0126	\$ 324,9	\$ 347,7
Intercambio Iónico	0,0226	0,0228	\$ 624,1	\$ 628,7
S. A. Electrónico	0,0026	0,0058	\$ 72,8	\$ 161,1
S. D. Magnético	0,0028	0,0060	\$ 75,9	\$ 164,5

A continuación, y a modo de comparación, se obtiene un valor de tarifa aproximado, basado en el costo por metro cúbico de agua consumida que paga un cliente del sistema IQQ-AH. Para obtener dicho valor de tarifa, denominada “Tarifa media IQQ-AH” (TM), se utilizan los valores publicados por la empresa sanitaria ADA para el mes de noviembre 2018 [90]. Así, contemplando los valores del “Grupo 2”, referentes a Iquique y Pozo Almonte, y sumando los cargos por conceptos fijos, punta, no punta y alcantarillado, se obtiene un valor aproximado de 2.092 pesos chilenos por metro cúbico<sup>87</sup>, que se traducen en **0,0760 [UF/m<sup>3</sup>]**.

Obtenida la TM, es posible dimensionar el porcentaje de aumento, referente a la tarifa, que significa la implementación de cada tratamiento en estudio, tal y como muestra la *Tabla 7.37*.

<sup>87</sup> El valor final de la tarifa mensual de AP a un cliente en particular, depende de la forma del consumo de agua, en cuanto a su horario y a su cantidad. Por esta razón, se hace complejo contemplar valores promedios de usos en horarios puntas y no puntas, así como también la existencia de sobreconsumos, cortes y/o reposiciones. Dicho esto, el valor aproximado presentado, resulta ser una buena base conservadora.

Tabla 7.37: Nueva tarifa sanitaria, por la implementación de los tratamientos en estudio, en el sistema IQQ-AH, y el respectivo aumento porcentual que significa dicha tarifa.

Tipo Tratamiento	Nueva Tarifa [UF/m <sup>3</sup> ]		Aumento Tarifario [%]	
	T. Centralizado	T. Disperso	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	0,0892	0,0975	17,34%	28,26%
Nanofiltración	0,0878	0,0886	15,51%	16,60%
Intercambio Iónico	0,0986	0,0988	29,79%	30,01%
S. A. Electrónico	0,0786	0,0818	3,47%	7,69%
S. D. Magnético	0,0788	0,0820	3,63%	7,85%

A modo de dimensionar el impacto del aumento tarifario en la cuenta de agua potable, en los Sistemas de IQQ-AH, se evalúa el incremento en una cuenta tipo para Iquique, con un consumo promedio de **20,07 [m<sup>3</sup>/cliente/mes]**, y para el caso de Alto Hospicio se adoptan **15,58 [m<sup>3</sup>/cliente/mes]** (determinados los valores actuales de las dotaciones de consumo, de cada localidad, para los primeros 5 años del horizonte de diseño), y la Tarifa Media determinada.

Así, se obtienen valores promedio de **42.054** y **32.648 [CLP]** al 31 de diciembre de 2018, para la cuenta mensual a pagar por cliente (sin IVA), por el servicio sanitario en Iquique y Alto Hospicio, respectivamente, pudiendo determinar el aumento en el costo de la cuenta mensual de AP a pagar por el cliente, presentado en la *Tabla 7.38*.

Tabla 7.38: Aumento en la cuenta de AP, a pagar mensualmente, debido a la implementación de los tratamientos en estudio.

Tipo Tratamiento	Aumento Cuenta Mensual [CLP/mes]			
	Tratamiento Centralizado		Tratamiento Disperso	
	Iquique	Alto Hospicio	Iquique	Alto Hospicio
Precipitación con Cal	\$ 7.291	\$ 5.661	\$ 11.884	\$ 9.226
Nanofiltración	\$ 6.522	\$ 5.063	\$ 6.980	\$ 5.419
Intercambio Iónico	\$ 12.528	\$ 9.726	\$ 12.620	\$ 9.798
S. A. Electrónico	\$ 1.461	\$ 1.134	\$ 3.233	\$ 2.510
S. D. Magnético	\$ 1.525	\$ 1.184	\$ 3.303	\$ 2.564

En vista de los resultados obtenidos, la implementación de los tratamientos de forma centralizada sería la más acertada para ambas localidades en estudio, al significar menores aumentos en la cuenta mensual de los usuarios.

Ahora bien, si el objetivo fuese la eliminación de la dureza (caso hipotético de incorporación a la normativa de calidad AP chilena), el abatimiento por Nanofiltración Centralizado es el elegido, a ser el más conveniente para el usuario, tanto de Alto Hospicio como de Iquique, con aumentos en la cuenta mensual que bordean los **5.000** y **6.500 [CLP]** (+15%), respectivamente. Se descarta el Intercambio Iónico como opción al estar en otra escala, con aumentos del orden del 30% de la cuenta mensual de AP, y la Precipitación con Cal aparece como segunda opción más conveniente (con el reparo de que su implementación de manera dispersa es inviable económicamente).

Por otra parte, si se busca eliminar solo los efectos de la dureza, manteniendo su concentración en el agua potable, la alternativa no convencional de un Sistema Antical Electrónico Centralizado en el Sistema IQQ-AH será la seleccionada, con aumentos entre **1.000** y **1.500 [CLP]** (+3,5%) en

la cuenta a pagar por los usuarios de Alto Hospicio e Iquique, respectivamente. Cabe mencionar que su par del tipo Desincrustante Magnético, también es una opción viable y económica, al significar un 3,6% de aumento en la cuenta a pagar.

### 7.5.11 Costos para la Empresa Sanitaria

Con las estimaciones de los costos reales de implementación (CTLPN\_R), y de aquellos costos que son amortiguados por concepto de aumento tarifario (CTLPN\_M), se determina el costo medio que asume la empresa sanitaria (Costo Sanitaria), según la ecuación (7.10).

$$\text{Costo Sanitaria}_r = \text{CTLPN}_R - \text{CTLPN}_M \quad (7.10)$$

La Tabla 7.39 muestra dichos costos, y además el porcentaje que representan, con respecto al CTLPN de Aguas del Altiplano (CT.ADA, mostrado en el Anexo 6 de su estudio tarifario, para la determinación de tarifas 2013-2018, incorporando el 17% de impuesto), y que significó un valor de 33.879,1 millones de pesos chilenos a diciembre de 2011, equivalentes a **1.519.649,0 [UF]**.

Tabla 7.39: Costos asumidos por la empresa sanitaria, y el porcentaje que representan dichos costos con respecto al CT.ADA.

Tipo Tratamiento	Costo Sanitaria [UF/año]		% del CT.ADA [%]	
	T. Centralizado	T. Disperso	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	59.852	59.752	3,9%	3,9%
Nanofiltración	127.449	126.562	8,4%	8,3%
Intercambio Iónico	196.708	197.190	12,9%	13,0%
S. A. Electrónico	2.971	2.951	0,2%	0,2%
S. D. Magnético	4.384	4.461	0,3%	0,3%

De la tabla, se observan variaciones marginales del costo para las sanitarias, dependiente de la forma de aplicación, donde un tratamiento centralizado resulta más costoso en un orden de; 1.000 [UF] para Nanofiltración, 500 [UF] para el Intercambio Iónico, 100 [UF] para la Precipitación con Cal y 20 [UF] para ambos tratamientos no convencionales.

En cuanto a la magnitud del costo para las sanitarias, tratamientos del tipo convencional como el Intercambio Iónico y la Nanofiltración bordean respectivamente las 200.000 y 130.000 [UF] aprox. De este tipo, la Precipitación con Cal resulta más conveniente, con un costo menor a la mitad (60.000 [UF]). Por otra parte, los tratamientos innovadores poseen costos en una escala menor a los anteriores, cuya magnitud oscila las 4.500 y 3.000 [UF], definiendo al Sistema Antical Electrónico, como el más económico.

Los porcentajes del CT.ADA (como referencia), muestran que la implementación de tratamientos innovadores, independiente de la forma de aplicación, implican un costo adicional para la sanitaria del 0,3-0,2%. Por otro lado, tratamientos convencionales bordean el 13-4% de costo adicional, significando un impacto económico aparentemente relevante.

En el caso de conocer la rentabilidad operacional o EBITDA<sup>88</sup> de ADA (o estimándola como el 40% de los ingresos totales de la sanitaria), se podría obtener el impacto directo de los costos de los tratamientos, como un porcentaje de disminución de las utilidades de la empresa.

Adicionalmente, en el ANEXO AD; “Tasa Interna de Retorno” se presenta otra forma de analizar los costos asumidos por la empresa sanitaria, según la rentabilidad de la inversión realizada por esta, para la implementación de cada tratamiento en estudio.

## 7.6 CONCLUSIONES

Si bien todos los tratamientos significan una variación tarifaria positiva, aquellos No Convencionales poseen magnitudes de menor impacto, con porcentajes de aumento que no alcanzan el 4% para el Centralizado, ni el 8% para uno Disperso (Tabla 7.37). Además, dichos porcentajes se ven reflejados en un aumento en la cuenta a pagar por el cliente de aproximadamente 1.100-1.600 [CLP], y 2.500-3.300 [CLP], para el TC y el TD respectivamente (Tabla 7.38).

De los tratamientos no convencionales (más económicos), el más conveniente para el cliente resulta ser el Sistema Antical Electrónico (S.A.E.), aplicado centralizadamente.

Por otra parte, analizando los costos asumidos por una empresa sanitaria al implementar alguno de los tratamientos abatidores de los efectos de la dureza, también se observa que aquellos No Convencionales son los más baratos, significando entre el 0,2 y el 0,3% del CTLPN (Tabla 7.39), referente a los costos mostrados por la empresa sanitaria del norte del país.

Luego, comparando dichos costos, dada la aplicación de los tratamientos No Convencionales, se observa que el más económico para la sanitaria es nuevamente el S.A.E., independiente<sup>89</sup> de la forma de implementación, ya que los Sistemas Desincrustantes Magnéticos son aproximadamente 1.400 (centralizado) y 1.500 [UF] (disperso) más caros.

Finalmente, el tratamiento recomendado para eliminar los efectos de la dureza en el sistema IQQ-AH, sería un Sistema Antical Electrónico, si se acepta no remover la dureza, y la Precipitación con Cal en el caso de considerar su remoción, donde ambos deben ser aplicados centralizadamente, para que así buena parte de los costos sean financiados por la tarifa.

Cabe mencionar que, si bien se evalúa el impacto tarifario de todos los tratamientos, la empresa modelo adoptaría, para su evaluación de costos, sólo el más eficiente (con menor CTLPN\_R), es decir el Sistema Antical Electrónico.

---

<sup>88</sup> Del inglés “Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization” (en español; Beneficio Antes de Intereses, Impuestos, Depreciaciones y Amortizaciones), definido como el beneficio bruto de explotación calculado antes de la deducibilidad de los gastos financieros

<sup>89</sup> En el detalle, existe una diferencia porcentual del 0,03% más caro para el centralizado, que en la práctica representan 20 [UF], lo que es muy bajo en comparación a los CTLPN de una sanitaria, por lo que dicha diferencia es marginal y no cabe dentro de un análisis de estimaciones de costos, según ingeniería conceptual.

## **8 EVALUACIÓN PRÁCTICA Y PRUEBA PILOTO DE ALTERNATIVA DESINCRUSTANTE**

Del capítulo anterior, se observa que ambos procesos no convencionales presentan una mayor factibilidad de implementación, y que sus diferencias de costos no son significativas. Así, se selecciona el Sistema Desincrustante Magnético para una prueba piloto, por las razones expuestas en el presente capítulo.

### **8.1 EVALUACIÓN PRÁCTICA; CRITERIO Y SELECCIÓN**

Según la *Tabla 7.37*, las dos alternativas innovadoras resultan ser las más baratas, y con un menor impacto tarifario, aun cuando tratan la totalidad del caudal, en comparación al porcentaje que tratan los sistemas Convencionales. De hecho, si se aplican de forma macro en el sistema IQQ-AH, la cuenta mensual a pagar por cliente aumenta en un rango de 3,5 a 3,7%, muy por debajo del 5%, estimado como el máximo porcentaje de aumento, sobre el cual, se generan inconvenientes de factibilidad.

Si bien, el más barato de los tratamientos No Convencionales resulta ser el Sistema Antical Electrónico, en reuniones con los proveedores del sistema, mencionan que el tratamiento resulta ser inestable en la distancia, y en el tiempo. Esto se debe a que el cambio en el equilibrio del agua permanecería solo hasta los 2 [km] de longitud de cañería entre el sistema y la salida del agua, y además que no aseguran que el efecto se mantuviera luego de 24 [hr] desde su tratamiento. Lo anterior no asegura un tratamiento homogéneo del agua, el que dependería de los largos de tubería entre el punto de tratamiento y de entrega al cliente de AP, además de la existencia de Estanques de AP o válvulas cerradas que retengan el agua por más de 24 [hrs].

Así, debido a que en los sistemas de producción y/o distribución de las sanitarias del norte de Chile existen longitudes de cañería mayores a 2 [km] y sistemas de acumulación de AP, se descarta el tratamiento S.A.E. para su implementación, dejando seleccionado el Sistema Desincrustante Magnético, por ser el segundo más barato, y tener un impacto tarifario del 3,63% de aplicado de forma centralizada, y 7,85% de forma dispersa.

Cabe recordar el S.A.E. fue seleccionado para incorporar al análisis del presente trabajo de título, a otro tratamiento innovador, por lo que, si se encontrara en el mercado un tratamiento innovador de similares características, pero sin las cualidades negativas para su implementación a gran escala, posiblemente sería seleccionado.

#### **8.1.1 Consideraciones para su Implementación**

Debido a que el presente estudio hace referencia a un diseño conceptual de la implementación de los distintos tratamientos, al momento de seleccionar uno para el sistema IQQ-AH, es necesario considerar variables más particulares al S.D.M, para su correcta instalación en los puntos aguas abajo de las PTAP, que se muestran en la *Figura 6.1*.

Es así, como para asegurar la transformación de calcita en aragonita, el fabricante hace hincapié en que se deben cumplir, siempre, las siguientes condiciones:

- 1) La condición de puesta en marcha del sistema, es tener al menos 2 [bar] de presión manométrica (dinámica), aguas arriba de los Aceleradores Iónicos.
- 2) Asegurar que en todo momento se logren 2 [bar] o más de presión, porque de lo contrario, no se genera el efecto desincrustante.
- 3) Controlar periódicamente que las presiones dinámicas manométricas, aguas arriba y aguas abajo de los Aceleradores Iónicos (en conjunto con los filtros de 50 micras), no difieran en más del 10%, y que siempre cumplan el punto 2).
- 4) De no cumplir el punto 2), habiéndose cumplido el punto 1), se debe realizar una limpieza del o los filtros de 50 micras, hasta lograr la condición inicial de presiones manométricas, siguiendo los procedimientos presentados en sus fichas técnicas.
- 5) Uso continuo y estricto de una válvula check, o sistema equivalente, aguas abajo de cada equipo Acelerador Iónico.
- 6) Según la antigüedad y longitud de la red tuberías de agua a desincrustar, y también de la dureza de la misma agua, la etapa de desincrustación inicial debe ser estudiada, para evitar efectos negativos en las redes de distribución, y por consiguiente en los clientes.

Recomendación: generar algún control, y posterior disminución, de las concentraciones de sólidos suspendidos totales de las aguas que tratan los aceleradores, para así disminuir los números de limpiezas periódicas de los filtros, en el tiempo (esto siempre y cuando se logren aguas con menores concentraciones de sólidos de 50, o más, micras de tamaño).

Por otra parte, para el caso de una implementación en el sistema IQQ-AH, en las inmediaciones de las PTAP Santa Rosa y El Carmelo, se presentan las siguientes recomendaciones de diseño:

- 1) Coordinar con los proveedores, previo y durante la ejecución de las obras civiles involucradas en la construcción de las locaciones en donde se pretendan instalar los sistemas.
- 2) Generar un sistema de control eficiente, de la presión manométrica (dinámica), en puntos críticos de los sistemas implementados.
- 3) Verificar que las presiones máximas alcanzadas en los puntos a instalar, no superen las presiones máximas de funcionamiento de los sistemas involucrados.
- 4) Consultar a los fabricantes las pérdidas de carga de los sistemas, sean válvulas, aceleradores y filtros, para un correcto diseño hidráulico.
- 5) Integrar un procedimiento de control y limpieza de las redes de agua durante los primeros días o semanas desde la puesta en marcha del sistema, debido a la esperada desincrustación inicial.

Debido al tamaño de los equipos aceleradores a fabricar, posiblemente se utilicen filtros y válvulas check con características y condiciones técnicas particulares (como caudales y presiones máximas de funcionamiento), las que se deben considerar en el diseño hidráulico.

Por característica propias de los sistemas de producción y distribución de Aguas del Altiplano en la región de Tarapacá, existe poca factibilidad de realizar una prueba a gran escala, en puntos como estaciones reductoras de presión, que podrían generar fallas y efectos indeseables en la distribución de AP para algún sector del sistema IQQ-AH. Por esta razón, se recomienda realizar una prueba piloto a pequeña escala, para así verificar la propiedad abatidora de los efectos del agua dura, en aguas producidas y distribuidas por el sistema en análisis.

Así, y tomando en consideración las recomendaciones y supuestos presentados, se realiza una prueba piloto del Sistema Desincrustante Magnético, en las dependencias del laboratorio de calidad de AP “Campos de Deportes”, ubicado en Iquique. Para esta prueba, se trabaja en conjunto con el proveedor del sistema (FLUYE S.P.A.), funcionarios y miembros del equipo de ingeniería de Aguas Nuevas S.A. en Santiago, en coordinación con la sede de Iquique de Aguas del Altiplano.

## **8.2 PRUEBA PILOTO DE ALTERNATIVA DESINCRUSTANTE**

Luego de realizar la evaluación logística, técnica y económica, y seleccionar la aplicación de Sistemas Desincrustantes Magnéticos, se determina realizar una prueba piloto a escala local, mediante el uso del equipo innovador “Acelerador Iónico NEW-ARA”, fabricado por VOSGES (AIV). Recordando que dicha alternativa no disminuye la concentración de calcita, por lo que la dureza no cambia, sí se presentaría un efecto visual en el corto plazo, según el proveedor, significando posiblemente un aumento positivo en la percepción de calidad del cliente.

Así, tras coordinación entre el proveedor del equipo AIV, con profesionales, y el memorista, del área de Gerencia de Planificación de Aguas Nuevas, en conjunto con los profesionales encargados del laboratorio de calidad de Aguas del Altiplano en Iquique, se gestiona una prueba piloto en dichas instalaciones, denominada “Campos de Deportes” en Iquique, Región de Tarapacá. Esta prueba como objetivo principal, comprobar la eficiencia del equipo abatidor de los efectos negativos de las aguas duras, haciendo hincapié en su capacidad desincrustante.

Uno de los plazos acordados para la prueba, fue que tuviera una duración mínima de 60 días, los que finalmente se cumplen, ya que transcurren 15 semanas desde la instalación del equipo desincrustante, realizada el viernes 17 de agosto de 2018, completando 69 días efectivos<sup>90</sup> de prueba, hasta el viernes 30 de noviembre de 2018.

Una vez terminada la prueba, se desarrolla el informe denominado “Informe Final Prueba Piloto Acelerador Iónico – Iquique, Laboratorio Campos de Deportes”, el cual se presenta en su totalidad en el ANEXO AG; “Informe Final Prueba Piloto Acelerador Iónico”, y del cual se obtienen las experiencias, resultados y observaciones, para lograr las conclusiones a presentar.

---

<sup>90</sup> Días operativos del laboratorio, dentro de las 15 semanas de prueba.

### 8.3 METODOLOGÍA DE LA PRUEBA PILOTO

Debido a que el principal objetivo de la prueba es poder comprobar la eficiencia del equipo AIV, se determina realizar distintos tipos de controles y muestreos, iguales para dos líneas de agua potable a comparar, una con tratamiento y otra sin este.

Como el principal efecto sobre el AP a comprobar es la capacidad desincrustante del AIV, la prueba piloto controla, mediante fotografías periódicas, el cambio en incrustaciones en grifería y en los depósitos de sarro en un hervidor eléctrico, definiendo así un procedimiento de control, presentado en el ANEXO AG; “Informe Final Prueba Piloto Acelerador Iónico”.

#### 8.3.1 Consideraciones para su Implementación

Así, la prueba piloto consiste en primer lugar, en encontrar dos líneas de abastecimiento de Agua Potable al edificio que posean conducciones independientes. La primera corresponde a la línea que abastece al laboratorio, que es impulsada por un sistema de bombeo 1+1, con una presión que oscila entre los 55 y 60 [psi] (3,79 y 4,14 [bar]), denominada Línea del Laboratorio (LAB). La segunda línea de abastecimiento corresponde a la que alimenta a las oficinas del establecimiento, con presión máxima desconocida, pero con un caudal máximo registrado de 7,5 [l/min], denominada Línea de Oficinas (LOF). A continuación, en la *Tabla 8.1*, se muestran las principales características de cada línea:

Tabla 8.1: Características principales de las líneas de abastecimiento de agua potable independientes.

	LAB	LOF	[Unidad]
Zona de Control abastecido	Comedor Laboratorio.	Lugar para café en oficinas.	[-]
Planos	Disponible.	No Disponible.	[-]
Origen	Impulsión sistema 1+1 en instalaciones.	Directo de Red de Agua Potable.	[-]
Diámetro Cañería	3/4	3/4	["]
Material Cañería	Cobre	Cobre con implante PVC	[-]
Presión Cañería Origen	3,8 – 4,1	-	[bar]
Caudal Máximo Origen	15,8	7,5	[l/min]
Caudal Máximo Control	5,4	-	[l/min]

Luego, se determinó que el lugar de instalación del equipo sería en la Línea del Laboratorio, particularmente en la cañería a la salida del sistema de bombeo, tal y como se observa en la *Figura 8.1* y en la *Imagen 8.1*. Dicho lugar fue elegido por su seguridad, facilidad para la instalación del equipo (el que se encuentra dentro de las dependencias del laboratorio), y también por su buena presión, la que en todo momento supera el mínimo de 2 [bar], al estar luego del sistema de bombeo. Por otra parte, la opción de tratar la Línea de Oficinas fue descartada, ya que el lugar donde sería posible la instalación del equipo, quedaba a la intemperie, tal y como muestra la imagen del ANEXO AE; “Imagen línea de Agua Potable”, y además, estaría pronta a ser intervenida.





Imagen 8.1: Línea de salida de la bomba de impulsión, de la red de AP del Laboratorio.

Es así como se determina que los lugares para realizar el muestreo son; el lavaplatos del comedor del laboratorio, para el agua tratada, y el lugar para café de las oficinas, tal y como se muestra en la *Imagen 8.2*.



Imagen 8.2: De izquierda a derecha, Lavaplatos del comedor del laboratorio, y lavaplatos del lugar para café de las oficinas.

### 8.3.2 Consideraciones y procedimiento de la prueba

#### 8.3.2.1 Lugar de la prueba para la instalación de los equipos de control

Una vez instalado el equipo en la sala de bombas, que impulsa la LAB, se instalan 2 hervidores nuevos en cada una de las líneas, en los cuales uno es de uso libre y otro de uso controlado según calendario y procedimiento de control (ver apartado 1.2 del Informe final, en el ANEXO AG; “Informe Final Prueba Piloto Acelerador Iónico”), para así verificar la eficiencia del equipo desincrustante.

Cabe mencionar que tanto el comedor del Laboratorio como el lugar para café en las oficinas son de un uso frecuente y comparable entre sí.

#### 8.3.2.2 Elementos Principales

A continuación, en la *Imagen 8.3*, se muestra el modelo de hervidor (marca THOMAS, modelo 24.250 LONZA, de 1,8 [l] de capacidad) utilizado para la prueba, (4 hervidores facilitados por Aguas Nuevas S.A.), y también la configuración del sistema desincrustante magnético a implementar, compuesto, de izquierda a derecha, por un manómetro análogo, una válvula anti-retorno (check), el acelerador iónico<sup>91</sup>, un filtro de 50 micras y una llave de paso (sistema facilitado por su proveedor en Chile, FLUYE S.P.A.).



Imagen 8.3: A la izquierda el modelo de hervidor utilizado para la prueba piloto, y a la derecha el sistema instalado en la línea de impulsión de agua potable que suministra al laboratorio de calidad de agua potable.

#### 8.3.2.3 Plazo de la prueba

En un principio se fijaron 60 días como mínimo, pero finalmente se alcanzan 69 días controlados de uso efectivo del agua en cada línea.

#### 8.3.2.4 Finalidad de la prueba

Definir la efectividad del sistema acelerador iónico mediante análisis cuantitativos, para los cuales se sigue un procedimiento de control, en donde se comparan los efectos del agua tratada

<sup>91</sup> Acelerador Iónico NEW-ARA agua fría, de 3/4" de diámetro, con una capacidad máxima de 60 [l/min].

(sector comedor del laboratorio), y agua sin tratar (sector para café de las oficinas), sobre hervidores y grifería. Para dicho procedimiento se recopilan fotografías tanto de los hervidores, para comprobar el cambio en los depósitos de sarro, como de la grifería, para comprobar el efecto desincrustante del AIV. Además, se controlan los parámetros de dureza, sólidos disueltos totales (SDT) y turbiedad del agua potable para ambas líneas (según procedimientos de laboratorio), junto con la presión manométrica en la sala de bombas que abastece la línea del laboratorio.

### 8.3.3 Instalación del sistema AIV

Luego de realizar un análisis de la configuración de las tuberías y del espacio existente en la sala de bombas que impulsa el agua potable de la línea del laboratorio, se instala el sistema AIV, quedando tal y como muestra la *Imagen 8.4*.



Imagen 8.4: Sistema AIV instalado en la sala de bombas, inmediatamente aguas arriba del sistema de bombeo.

### 8.3.4 Instalación de hervidores

Luego instalar el AIV, y coordinar con el personal, tanto del Laboratorio como de las oficinas, el correcto cumplimiento del calendario y protocolo de la prueba, el día viernes 17 de agosto de 2018, se instalan los hervidores, como muestra la *Imagen 8.5*, y se da inicio a la prueba piloto.



Imagen 8.5: Lugares de instalación de los hervidores, tanto en el comedor del laboratorio (izquierda), como en el sector para café de las oficinas (derecha). En ambas imágenes se diferencian los hervidores de uso controlado con marcas rojas.

### **8.3.5 Consideraciones adicionales**

- Se marcaron de color rojo los hervidores controlados, para asegurar la misma frecuencia de uso en ambas líneas.
- Tanto el calendario de control como la pauta del protocolo de la prueba se dejaron a la vista cerca de los hervidores, en ambos sectores, tal y como se observa en la *Imagen 8.5*.
- Ambos hervidores controlados no fueron utilizados para otros fines ajenos al procedimiento.
- Durante la duración de la prueba piloto, se solicitó que ninguno de los 2 hervidores controlados fuera lavado.
- Cabe mencionar que el objetivo de dejar 500 [ml], consiste en fomentar la deposición de sarro en el fondo del hervidor, para así realizar un mejor análisis de los resultados.
- Inicialmente se estimó una dureza inicial de  $600 \pm 100$  [mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ], dadas las características medias del sector. Sin embargo, esta es muy variable y depende de la dureza de los sondeos de la fuente de origen (de igual forma, las mediciones dieron los valores reales de dureza).
- Se realizan otras pruebas y procedimientos adicionales, con el fin de complementar aún más los resultados obtenidos.

## **8.4 RESULTADOS DE PRUEBA PILOTO PRINCIPAL**

### **8.4.1 Incrustación en hervidores**

A continuación, se muestra un extracto del avance de las incrustaciones en los hervidores de uso controlado, tanto de la línea con tratamiento como la sin tratamiento, transcurridos los 69 días efectivos de prueba piloto, durante 15 semanas.

Cabe recordar que durante la semana 6 de prueba, se realiza una limpieza de todos los hervidores de ambas líneas, luego de verificar incrustaciones en los hervidores de la línea tratada, por el proceso de desincrustación inicial de la línea. Luego de este procedimiento, no se observan incrustaciones en los hervidores de la línea tratada (para más detalles, revisar ANEXO AG; “Informe Final Prueba Piloto Acelerador Iónico”).

#### **8.4.1.1 Hervidores agua sin tratamiento**

Se presenta el avance de depósitos e incrustaciones calcáreas durante los días de prueba en el hervidor de uso controlado, que utiliza agua de la línea sin tratamiento adicional, en la zona para café de las oficinas, en las imágenes a continuación.



Imagen 8.6: Fotos de los estados del hervidor controlado de la zona para café, al finalizar las semanas 1, 2, 3, 4, 5 y 6 (de izquierda a derecha, de arriba abajo).



Imagen 8.7: Fotos de los estados del hervidor controlado de la zona para café, al finalizar las semanas 7, 8, 9, 10, 11 y 12 (de izquierda a derecha, de arriba abajo).



Imagen 8.8: Fotos de los estados del hervidor controlado de la zona para café, al finalizar las semanas 13, 14 y 15 (de izquierda a derecha, de arriba abajo).

#### 8.4.1.2 Hervidores agua tratada

Se presenta el avance de depósitos e incrustaciones calcáreas durante los días de prueba en el hervidor de uso controlado, que utiliza agua de la línea tratada por el AIV, en la zona del comedor del laboratorio, en las imágenes a continuación.

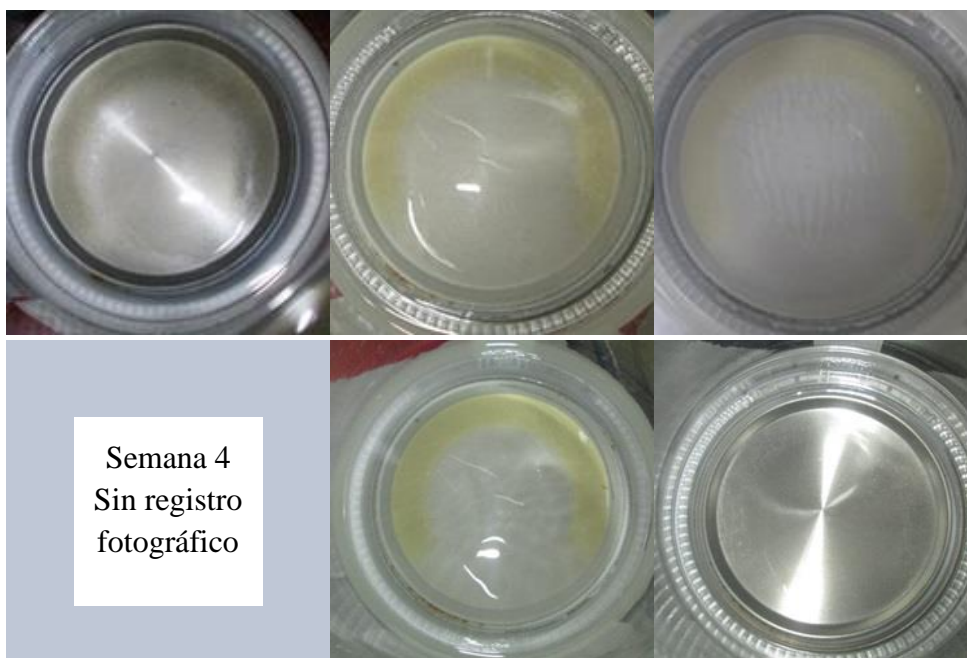


Imagen 8.9: Fotos de los estados del hervidor controlado zona del comedor del laboratorio, al finalizar las semanas 1, 2, 3, 5 y 6 (de izquierda a derecha, de arriba abajo).



Imagen 8.10: Fotos de los estados del hervidor controlado zona del comedor del laboratorio, al finalizar las semanas 7, 8 y 9 (de izquierda a derecha, de arriba abajo).



Imagen 8.11: Fotos de los estados del hervidor controlado zona del comedor del laboratorio, al finalizar las semanas 10, 12, 13, 14 y 15 (de izquierda a derecha, de arriba abajo).

### 8.4.1.3 Comparación condición final<sup>92</sup>

En la *Imagen 8.12* se muestra la condición final de los hervidores controlados de las líneas, luego de una limpieza simple (esponja y detergente de platos, agua, y sin uso excesivo de fuerza).



Imagen 8.12: Condición final de los hervidores controlados de la línea con tratamiento a la izquierda y sin tratamiento a derecha.

<sup>92</sup> Se debe considerar, que las incrustaciones y depósitos finales de los hervidores, corresponden al uso de ellos durante 9 semanas, debido a las limpiezas durante la semana 6.

A modo de comentario general, se observa que la línea tratada no genera sarro duro en el hervidor, pero si un polvillo en suspensión, que debido a la acumulación constante de los 500 [ml] luego de usarlo (condición fijada para los hervidores controlados), genera depósitos a simple vista como los mostrados por la Imagen 8.13.



Imagen 8.13: Residuos en el fondo del hervidor controlado (agua tratada), luego de 4 semanas de uso.

El hervidor mostrado, alcanzó dicha condición luego de 4 semanas de uso, significando 60 hervidas de agua a su capacidad máxima de 1,8 [l], de los cuales 1,3 [l] eran de agua de la llave (línea del laboratorio-tratada), y los 500 [ml] restantes, de agua hervida previamente.

Luego de dar cuenta de este fenómeno, se procede a realizar un procedimiento adicional a la prueba piloto, el que consiste en una observación cualitativa dichos residuos. Así, se extrajeron 200 [ml] de los 500 [ml] acumulados, y se dejaron reposar en un vaso precipitado, obteniendo finalmente los depósitos decantados que muestra la Imagen 8.14.



Imagen 8.14: Condición final del vaso precipitado y los depósitos decantados, transcurridos 56 [min] en reposo.

Las imágenes anteriores demuestran que el sistema elimina el problema de la incrustación, pero no impide que la dureza se manifieste visualmente dentro del hervidor, ya que al precipitar por aumento de temperatura se genera un polvillo que, si se acumula en el tiempo, podría ser perjudicial para la percepción de los usuarios. Por su parte, el hervidor de la línea no tratada se incrusta fácilmente, haciendo necesario el uso de químicos para su remoción.

### 8.4.2 Incrustación en grifería

No se observaron cambios relevantes en las incrustaciones de las griferías<sup>93</sup>, debido a que las condiciones iniciales de éstas diferían mucho, por lo que no se puede realizar una conclusión al respecto. Ejemplo de esto es que la incrustación inicial en la grifería de la línea sin tratamiento era mucho mayor a la de la grifería de la línea de agua tratada, y además ambas tenían distintos modelos, dimensiones, y antigüedad. En la *Imagen 8.15*, se presenta una comparación entre el nivel de incrustación a la salida de la grifería del lavaplatos de ambos sectores, donde quedan en evidencia sus diferencias.



Imagen 8.15: Condición inicial de la salida de la grifería del lavaplatos, de la zona para café de las oficinas, y del comedor del laboratorio, de izquierda a derecha respectivamente.

### 8.4.3 Gráficos de parámetros controlados

A continuación, se presentan los valores determinados en laboratorio de los parámetros controlados, durante todas las semanas de la prueba piloto.

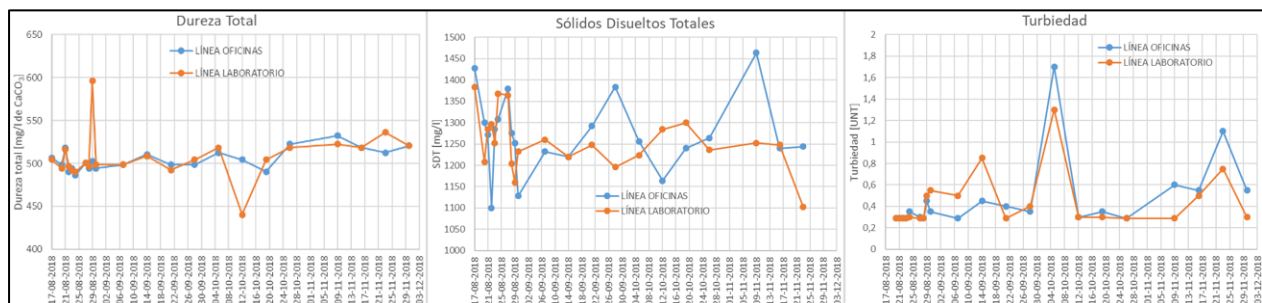


Gráfico 8.1: Extracto de los resultados de Dureza, Sólidos Disueltos Totales, y Turbiedad del agua potable (de izquierda a derecha, en función del tiempo), diferenciando con color naranja el agua tratada y en color celeste aquella sin tratar.

<sup>93</sup> Salvo el filtro de la grifería del lavaplatos del comedor del laboratorio, la que se dejó de incrustar, según el personal.

Finalmente, en la Tabla 8.2 se presenta un resumen con los promedios de los parámetros controlados durante las 15 semanas de prueba, verificando la nula remoción de dureza.

Tabla 8.2: Resumen con los promedios de los parámetros controlados durante las 15 semanas de prueba, y el límite normativo respectivo. SDT refiere a la concentración de Sólidos Disueltos Totales.

Parámetros Controlados	Línea Oficinas (sin acelerador)	Línea Laboratorio (con acelerador)	Límite Normativo NCh409/1.Of2005
Dureza Total [mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	504,8	507,7	-
Sólidos Disueltos Totales [mg/l]	1272,8	1253,4	1500
Turbiedad [UNT]	0,47	0,44	2

## 8.5 RESULTADOS DE PRUEBAS Y PROCEDIMIENTOS ADICIONALES

Los principales resultados de las pruebas y procedimientos adicionales, se presentan en el ANEXO AF; “Resultados de pruebas y procedimientos adicionales”.

## 8.6 COMENTARIOS

- Las condiciones de uso no se asemejan lo ocurrido en una línea de baño de casa, con ducha, pero si posee gran uso por las pruebas de calidad realizadas todos los días. Sin embargo, la línea específica que llega a la zona de descanso del laboratorio, posee un uso pausado, dependiente solo del uso para el llenado de hervidores, lavado de platos, lavado de manos y algún otro. Dichos usos no conllevan dejar el agua corriendo por más de 30 segundos, o 1 minuto, dada además la actual política de uso y cuidado responsable del agua, debido a la incipiente crisis hídrica mundial. Razón por la cual, se pueden mejorar los resultados realizando una prueba similar, pero en un baño tipo, con artefactos comunes a este.
- Además, sería bueno realizar una prueba de comparación a mayor escala, y con la totalidad de artefactos del baño, cocina y electrodomésticos que interactúan con el agua potable en un hogar estándar, y así lograr resultados más completos en cuanto al cambio en la percepción del cliente por el uso del sistema desincrustante. También se recomienda realizar una prueba piloto con una tubería incrustada en su interior con calcita (sarro), de un espesor considerable, y estudiar la velocidad de limpieza, y las características del agua de salida producto de la desincrustación general sobre tuberías, entre otros.
- Como observación, y luego de conversar con los usuarios habituales<sup>94</sup> de la línea tratada del laboratorio, la percepción de ingerir el carbonato cálcico (en su forma aragonita), en vez de dejarlo incrustado en las tuberías o hervidores (en su forma calcita), generaba en algunos casos recelo e inseguridad. Sin embargo, si no se acumula la aragonita en el fondo, utilizando toda el agua hervida en cada uso, el polvillo es imperceptible.

<sup>94</sup> Agradecimiento a todos los que aportaron durante los meses de la prueba, en especial a Alberto Kresse, Hilda Valenzuela, Andrés Aracena, David Zaharia, Fabiola Vega, y a los participantes del test de sabor, los que gracias a su apoyo, disposición y participación permitieron un correcto desempeño de todas las pruebas y actividades.

## 9 CONCLUSIONES

### 9.1 CONCLUSIONES GENERALES

El análisis de la información recopilada, tanto de las empresas prestadoras de servicios, como del regulador, permitió ratificar la existencia de una relación inversamente proporcional entre el nivel de satisfacción de los clientes de las empresas sanitarias de zonas urbanas y la dureza del agua suministrada, factor que predomina por encima de otros parámetros como el precio o la continuidad del servicio, en zonas con durezas sobre los 300 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] (norte de Chile).

Por ende, la idea de tratar las aguas con el fin de aminorar o eliminar los efectos indeseados de la dureza de las aguas del norte de Chile, tiene una alta probabilidad de generar un efecto positivo en la percepción de los usuarios de agua potable.

Ante este escenario, el estudio desarrollado se centró en evaluar técnica y económicamente procesos de tratamiento para los sistemas de Iquique y Alto Hospicio, en la Región de Tarapacá, considerando no sólo la remoción de los componentes de la dureza, sino otras alternativas capaces de eliminar los efectos indeseables de las aguas duras.

Así, y tras analizar a nivel de factibilidad las condiciones y costos de habilitación de los distintos procesos, la forma de aplicación más conveniente resultó ser la centralizada.

Luego, y bajo la primicia de que la tarifa paga parte de los costos, la aplicación centralizada de los tratamientos evaluados se mantuvo como la más económica, tal y como muestra la Tabla 9.1, razón por la cual se propone esta forma de implementación para el sistema en estudio.

Tabla 9.1: Resumen de los resultados obtenidos en el estudio, en cuanto a costos anuales y aumentos mensuales en la cuenta AP.

Tipo Tratamiento	Costo anual Sanitaria [CLP/m <sup>3</sup> ]		Aumento cuenta [CLP/mes]	
	T. Centralizado	T. Disperso	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	\$ 36,26	\$ 36,30	\$ 6.476	\$ 10.555
Nanofiltración	\$ 76,43	\$ 76,89	\$ 5.793	\$ 6.199
Intercambio Iónico	\$ 119,50	\$ 119,79	\$ 11.127	\$ 11.209
Sistema Antical Electrónico	\$ 1,78	\$ 1,79	\$ 1.297	\$ 2.871
Sistema Desincrustante Magnético	\$ 2,66	\$ 2,71	\$ 1.354	\$ 2.933

En vista de los datos<sup>95</sup>, las técnicas no convencionales evaluadas, capaces de subsanar los inconvenientes relacionados a la dureza del agua (principalmente incrustación), presentan costos similares y de poca magnitud relativa, junto con una variación tarifaria marginal, significando aumentos factibles de aplicar en la cuenta de agua potable mensual de los usuarios.

Por otro lado, los resultados obtenidos muestran que los sistemas de remoción (o convencionales) resultan mucho más onerosos que los que eliminan sólo la capacidad de precipitación/incrustación de la dureza (innovadores o no convencionales).

<sup>95</sup> Considerando más de 47 millones de metros cúbicos distribuidos al año, en el sistema Iquique – Alto Hospicio.

En este contexto, y sabiendo que la tarifa pagará los costos del tratamiento más eficiente para cumplir la normativa de calidad de agua potable, se plantean 3 posibles horizontes;

1. **La norma establece un límite para alguno de los efectos de la dureza:** incorporando, por ejemplo, una nueva característica organoléptica, que limite un cierto nivel de incrustación del agua a los 100 [°C]. La tarifa pagaría buena parte de los costos asociados a tratamientos no convencionales, con un impacto marginal en la cuenta mensual de los usuarios, y las sanitarias asumirían costos relativamente bajos.
2. **La norma establece un límite para la concentración de dureza:** pudiendo ser la “dureza objetivo” planteada en el presente estudio, de 150 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>]. Se aplicarían tratamientos de abatimiento de dureza convencionales, similares a la Precipitación con Cal, significando un impacto tarifario 5 veces más grande para los usuarios, y un aumento considerable en los costos anuales de las sanitarias (más de 12 veces los del horizonte 1.).
3. **La normativa no establece límite alguno respecto a la dureza del agua (estado actual):** la incorporación de tratamientos abatidores de los efectos de la dureza, queda a costo directo para las empresas sanitarias, siendo más de 20 veces los costos asumidos por las sanitarias en el horizonte 1., para tratamientos no convencionales, y entre 3 a 5 veces más costosos para el caso de los convencionales, tal y como muestra la Tabla 9.2. En este último horizonte, dichos costos pueden entenderse como una inversión por parte de las sanitarias para obtener una mejoría en su imagen, en el corto y/o mediano plazo. Además, los tratamientos abatidores de incrustación (no convencionales), siguen siendo los más convenientes.

Tabla 9.2: Resumen de los resultados obtenidos en el estudio, respecto al costo anual total de cada uno de los tratamientos.

Tipo Tratamiento	Costo anual Sanitaria [CLP/m <sup>3</sup> ]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	\$ 210	\$ 319
Nanofiltración	\$ 232	\$ 243
Intercambio Iónico	\$ 417	\$ 420
Sistema Antical Electrónico	\$ 37	\$ 79
Sistema Desincrustante Magnético	\$ 39	\$ 81

Si bien los costos asociados a los tratamientos convencionales evaluados, dependen directamente de la concentración de dureza del agua a tratar, los procesos más económicos (no convencionales), no aseguran un funcionamiento 100% eficiente, debido a la falta de ejemplos de aplicación a gran escala en sistemas de producción/distribución de aguas potables con cargas minerales importantes, como las del norte de Chile.

Por otra parte, se plantea la incertidumbre de que, si el sistema sanitario chileno estaría dispuesto a superar el estándar normativo, y entregar un agua de mejores características organolépticas, en pro de una mejor percepción de la calidad del AP.

De no ser acogida la incorporación de la dureza (como concentración límite o efecto indeseable) a la norma, surge la interrogante de si ¿La sociedad chilena está dispuesta a incorporar

procesos abatidores de los efectos de la dureza en general, considerando el costo económico y logístico de aquello, o el camino a seguir debería ser el de combatir los efectos de durezas extremas de casos particulares, mediante procesos/equipos/sistemas más baratos?

En cuanto a la prueba piloto realizada, si bien se verificó el funcionamiento del acelerador iónico eliminando la capacidad incrustante del agua dura, este no resultó ser del todo concluyente debido posiblemente; (1) al acotado espectro de parámetros controlados, (2) a la falta de registro de cañerías altamente incrustadas, o (3) a las griferías sumamente manchadas y en distintas condiciones iniciales. Además, dado que el protocolo de prueba fomentaba la deposición de carbonato cálcico (en forma de polvillo) en los hervidores, el aspecto del agua tratada no generaba aceptación general por la alta turbiedad que fue ganando con el tiempo. En el apartado siguiente, se presentan las conclusiones particulares de esta prueba piloto.

## **9.2 RESPECTO DE LA PRUEBA PILOTO**

Con los antecedentes, pruebas y registros realizados, se verifica la eficacia del sistema Acelerador Iónico en cuanto al cambio en la estructura de la molécula de calcita, a su forma aragonita, generando así un efecto desincrustante. Dicha desincrustación requiere un seguimiento y protocolo inicial de las líneas intervenidas debido al arrastre de calcita incrustada inicialmente, dado el efecto desincrustante del sarro depositado en el pasado, dentro de las cañerías.

En cuanto al efecto del acelerador sobre el uso diario de los hervidores, se verifica una marcada diferencia entre el tipo de depósitos de cada línea, en donde la incrustación en el fondo de los hervidores con agua sin tratamiento es evidente y requiere de sustancias (como el ácido cítrico) para su remoción. Por otra parte, en la línea con tratamiento, los hervidores poseen una decantación en forma de polvillo fino (carbonato de calcio en su forma aragonita), que solo necesita de un paño y agua para su remoción.

Sin embargo, por las características de la prueba, la acumulación de los 500 [ml] de agua hervida, fomentó la acumulación progresiva de carbonato de calcio, tanto en su forma incrustada como calcita (línea de oficinas, sin tratamiento), como en su forma decantada como aragonita (línea de laboratorio, con tratamiento).

Se deja en evidencia la necesidad de una limpieza con ácido cítrico del filtro del acelerador, debido a que las limpiezas manuales no logran disminuir la pérdida de carga producto de la posible incrustación del filtro (según las diferencias porcentuales mostradas).

Debido a la saturación periódica del filtro, se comprueba la existencia de sólidos suspendidos de tamaño igual o mayor a 50 [micras], en el agua potable distribuida.

Se verifica también una percepción positiva en cuanto a la sensación y sabor del agua pasada por el acelerador iónico, según el test de sabor realizado. Sin embargo, para obtener resultados más concluyentes se sugiere realizar una prueba con una mayor muestra de individuos.

El test de espuma, realizado bajo un procedimiento muy simple (emulando una comparación entre clientes del agua potable), se podría efectuar de forma más controlada, midiendo exactamente las dosis tanto de agua como de detergente, o mecanizando el procedimiento de estrujar la esponja, ya que son susceptibles a errores experimentales.

Se deja constancia de la posible diferencia en la eficiencia eléctrica entre cada hervidor, debido a que la capa incrustada del hervidor de la línea sin tratamiento, posiblemente empeore la eficiencia eléctrica del mismo, en comparación a la línea tratada, en la que el polvillo decantado no permanecía contacto con la base del hervidor (lugar donde ocurre el traspaso de calor). De todas formas, se recomienda realizar una prueba en el futuro, para verificar dicho supuesto.

Finalmente, y luego de verificar el correcto funcionamiento del sistema desincrustante, pero previo a su implementación de forma centralizada, la empresa sanitaria debería estudiar las implicancias de la desincrustación de las líneas existentes, teniendo además principal atención en:

- El destape de fisuras de cañerías corroídas e incrustadas, ocasionando rupturas de cañerías.
- El aumento de los sólidos disueltos, y daños, tanto en la red de distribución, lodos en estanques, como posibles daños a clientes en artefactos, griferías tapadas, aumento de la turbiedad, etc.
- El problema de la purga del filtro de 50 micras.

Por otra parte, y considerando que la desincrustación fue difícil de dimensionar, pasar a una prueba a escala de producción y/o distribución sería muy arriesgado, dejando abierta esta memoria al posible estudio de una instalación en, por ejemplo:

- La aducción a los verdes (al sur de Iquique, que alimenta el aeropuerto), donde se evaluaría el arrastre de sedimentos producto de la desincrustación en una tubería de gran longitud.
- Implementación en un edificio nuevo de dos torres con líneas independientes de agua potable, comparando en tiempo real los efectos en todos los artefactos, sanitarios y electrodomésticos de un hogar.

### **9.3 COMENTARIOS FINALES**

Los resultados sugieren que, si el abatimiento de los efectos de las aguas duras se replica en otras regiones del país, que tengan problemas ligados a la dureza de sus aguas potables, se generaría un efecto positivo en la percepción de la calidad del servicio entregado por parte de la sanitaria. Además, se recomienda incorporar tratamientos innovadores, ya que además de ser más económicos, tienen una mejor factibilidad de incorporación a los sistemas de tratamientos actuales.

Sin embargo, previo a incorporar estos tratamientos en líneas de producción y distribución de agua potable, se deben considerar pruebas piloto más robustas, que aseguren, tanto el correcto funcionamiento del sistema de agua potable en su condición normal, como la eficacia y seguimiento del efecto abatidor sobre la dureza.

Además, la aplicación de estos sistemas desincrustantes podría generar para la empresa sanitaria, una mejora en su imagen a un costo menor, y, si fuera reconocida en los procesos tarifarios, significaría para los usuarios un menor importe y un beneficio en distintos ámbitos, como el mantenimiento de electrodomésticos y griferías incrustadas, disminución de consumo de agua embotellada, y una mejora en la calidad percibida del agua para sus usos cotidianos. Concretar esta alternativa sería más expedito si se normara la concentración de dureza en el país, como ocurre en otras legislaciones del continente, más allá de su nulo impacto en la salud de los consumidores.

Se comprueba, la conveniencia de aplicar tratamientos de agua de manera centralizada, en sistemas de producción/distribución existentes, por lo que se podría extrapolar dicho criterio para la Ingeniería Conceptual de otros proyectos afines.

Surge una paradoja, donde por un lado existe una mejora en la percepción del cliente, por el aumento en la calidad del agua en cuanto a la eliminación de los efectos de la dureza, pero que, por otro lado, podría verse opacada por la percepción negativa dado un aumento de la tarifa. No obstante, existe dificultad técnica y falta de data histórica, en cuanto a percepciones particulares, y así confirmar cuál de los dos efectos sería más importante para los clientes del norte de Chile.

De ser incorporada a la normativa, se sugiere que previamente, se realice un catastro de la dureza a nivel nacional, de mejor calidad y con mayores puntos de muestreo que los actuales, de las aguas, tanto crudas como potables. Además, el presente estudio propone desarrollar un anexo normativo que exija tratar las aguas potables de dureza extrema (que igualen o superen el límite propuesto de 1000 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>]), en conjunto con una recomendación de tratamiento para que las sanitarias incorporen tratamientos que disminuyan los efectos, según los niveles de dureza.

Siguiendo este camino, se proponen diversos mecanismos de implementación; a) dar la opción a los clientes mediante un pago mensual cargado a la tarifa (máximo durante 1 año), b) generar una alianza con proveedores para que los clientes accedan a dicho tratamiento, c) subvención por parte del estado a las sanitarias, para la incorporación del proceso en líneas de distribución o producción, d) subvención a clientes con niveles de dureza elevados, y que en caso de que su situación económica o la concentración de dureza (fijada) lo amerite, opten a la subvención completa o parcial por parte del estado, en alianza con las sanitarias, para realizar la gestión, o e) implementación en comunidades, como departamentos, condominios o vecinos organizados que comparten la misma matriz de distribución, o implementación local en casas, oficinas, restaurantes y otros establecimientos particulares.

Finalmente, en el contexto del estudio, se le presenta una oportunidad de innovación a la industria sanitaria chilena, respecto al tratamiento del agua enfocado en la satisfacción de los clientes, dadas las características heterogéneas y de suficiente disponibilidad hídrica en el país. Así, si se complementa con una mayor inversión en Investigación y Desarrollo, una normativa más robusta, y estudios locales, se podría alcanzar un mayor nivel de vanguardia comparable, por ejemplo, con el que ha alcanzado la industria de la construcción en cuanto a resistencia sísmica.

## 10 REFERENCIAS

---

- [1] Survival Topics, «How Long Can You Survive Without Water?», *survivaltopics.com*, ene. 26, 2011. <https://www.survivaltopics.com/survival/how-long-can-you-survive-without-water/> (accedido dic. 15, 2018).
- [2] Hydration for Health, «Agua e hidratación: Bases fisiológicas en adultos», *Hydration for Health*. <https://www.hydrationforhealth.com/es/ciencia-de-la-hidratacion/laboratorio-de-hidrataci%C3%B3n/agua-e-hidrataci%C3%B3n-bases-fisio%C3%B3gicas-en-adultos/#agua-en-el-cuerpo> (accedido ago. 15, 2018).
- [3] EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA), «Scientific Opinion on Dietary Reference Values for water», *EFSA J.*, vol. 8, n.º 3, p. 8, 2010, doi: 10.2903/j.efsa.2010.1459.
- [4] E. López Maldonado, «¿Sabías que el agua químicamente pura no existe en la naturaleza?», *Centro de Informacion*, oct. 22, 2018. <https://www.cideteq.mx/CentrodeInformacion/2018/10/22/sabias-que-el-agua-quimicamente-pura-no-existe-en-la-naturaleza/> (accedido dic. 15, 2018).
- [5] Khan Academy, «Propiedades disolventes del agua (artículo)», *Khan Academy*. <https://es.khanacademy.org/science/biology/water-acids-and-bases/hydrogen-bonding-in-water/a/water-as-a-solvent> (accedido ago. 15, 2019).
- [6] American Water Works Association, *Calidad y tratamiento de agua; Manual de suministros de agua comunitaria.*, 5ta ed. en inglés, 1ra ed. español. España: McGraw-Hill, 2002.
- [7] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Agua dura: Cómo se produce el sarro y por qué no está normado en Chile.», *SISS*, sep. 30, 2014. <http://www.siss.gob.cl/586/w3-article-10913.html> (accedido abr. 29, 2018).
- [8] Instituto Nacional de Normalización (Chile), «Agua Potable – Parte 1 – Requisitos. NCh409/1.Of2005». Santiago, 2006.
- [9] European Food Safety Authority (EFSA), «Dietary Reference Values for nutrients Summary report», *EFSA Support. Publ.*, vol. 14, n.º 12, p. e15121E, 2017, doi: 10.2903/sp.efsa.2017.e15121.
- [10] G. F. Bonatici Aguilar, «El Agua que Bebemos», Memoria (Geólogo), Santiago. Universidad de Chile, Departamento de Geología, 2017.
- [11] Ley Chile y Ministerio de Salud, «Decreto 106 - Aprueba reglamento de Aguas Minerales», *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, jun. 14, 1997. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=73577&f=2001-09-20&p=> (accedido jul. 27, 2018).
- [12] W. McGowan, *Water processing: residential, commercial, light-industrial*, 3er ed. Water Quality Association, 2000.
- [13] World Health Organization (WHO), «Hardness in Drinking-water». Geneva, WHO press, 2011.
- [14] United States Geological Survey (USGS), «Hardness of Water», 2016. [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/hardness-water?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/hardness-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) (accedido nov. 06, 2018).
- [15] Water Quality Association (WQA), «Scale Deposits», 2016. <https://www.wqa.org/learn-about-water/perceptible-issues/scale-deposits> (accedido ene. 20, 2020).
- [16] World Health Organization (WHO), *Guidelines for drinking-water quality.*, 4th ed. incorporating the first addendum. Geneva, 2017.

- [17] Fundación Chile, «Radiografía del Agua; Brecha y riesgo hídrico». Escenarios Hídricos 2030, CHILE, jun. 2018, [En línea]. Disponible en: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/05/radiografia-del-agua.pdf>.
- [18] Ministerio de Salud, «Norma de Uso de Fluoruros en la prevención odontológica. Norma General Técnica N° 105». Santiago, nov. 27, 2008, [En línea]. Disponible en: [https://diprece.minsal.cl/wp-content/uploads/2019/02/norma-de-fluoruros\\_conResEx\\_V2019.pdf](https://diprece.minsal.cl/wp-content/uploads/2019/02/norma-de-fluoruros_conResEx_V2019.pdf).
- [19] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Estudio de Percepción de la Calidad de Servicio de las Empresas Sanitarias 2016. Informe Final - Sector Sanitario», 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.siss.gob.cl/586/articles-16729\\_est\\_percep.pdf](https://www.siss.gob.cl/586/articles-16729_est_percep.pdf).
- [20] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Percepción de clientes», *Superintendencia de Servicios Sanitarios*. <http://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6426.html> (accedido feb. 12, 2019).
- [21] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Estudio de Percepción de la Calidad de Servicio de las Empresas Sanitarias 2016. Informe Final - Aguas del Altiplano (Región de Arica y Parinacota)», 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.siss.gob.cl/586/articles-16711\\_est\\_percep.pdf](https://www.siss.gob.cl/586/articles-16711_est_percep.pdf).
- [22] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Estudio de Percepción de la Calidad de Servicio de las Empresas Sanitarias 2016. Informe Final - Aguas del Altiplano (Región de Tarapacá)», 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.siss.gob.cl/586/articles-16710\\_est\\_percep.pdf](https://www.siss.gob.cl/586/articles-16710_est_percep.pdf).
- [23] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Informe de Gestión del Sector Sanitario 2017», 2017. [En línea]. Disponible en: [https://www.siss.gob.cl/586/articles-17283\\_recurso\\_1.pdf](https://www.siss.gob.cl/586/articles-17283_recurso_1.pdf).
- [24] Radio Cooperativa, «¿El agua de la llave es más sana que la embotellada?», *Cooperativa.cl*, jul. 05, 2015. <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/servicios-basicos/agua/el-agua-de-la-llave-es-mas-sana-que-la-embotellada/2015-07-05/142823.html> (accedido abr. 12, 2018).
- [25] Instituto Nacional de Normalización (Chile), «Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. NCh1333.Of78 Mod.1987». Santiago, 1987.
- [26] World Health Organization (WHO), *Guidelines for drinking-water quality, Volume 1 Recommendations*, 2nd ed. Geneva, 2004.
- [27] Admin, «Detectan que en 12 comunas de Chile se incumplen parámetros de calidad del agua», *CodeXVerde*, jul. 04, 2018. <https://codexverde.cl/detectan-que-en-12-comunas-de-chile-se-incumplen-parametros-de-calidad-del-agua/> (accedido may 11, 2018).
- [28] J. G. Henry y G. W. Heinke, *Ingeniería ambiental*. Pearson Educación, 1999.
- [29] Cámara de Diputadas y Diputados, «Diputados solicitan establecer límites máximos para la dureza del agua», *Sitio oficial de la Honorable Cámara de Diputadas y Diputados de Chile*, dic. 13, 2013. [https://www.camara.cl/prensa/sala\\_de\\_prensa\\_detalle.aspx?prmId=86025](https://www.camara.cl/prensa/sala_de_prensa_detalle.aspx?prmId=86025) (accedido mar. 22, 2018).
- [30] I. Vitoria Miñana, «Calcio en el agua de bebida en la infancia: ¿molesto o necesario?», *ACTA Pediatr. Esp.*, vol. 60, p. 11, 2002.
- [31] I. Vitoria Miñana y T. Arias Jordá, «Importancia nutricional del agua de consumo público y del agua de bebida envsada en la alimentación del lactante. Estudio descriptivo de base poblacional», *Scribd*, 2000, [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/307452472/Importancia-nutricional-del-agua-de-consumo-publico-y-del-agua-de-bebida-envsada-en-la-alimentacion-del-lactante-Estudio-descriptivo-de-base-poblaci>.

- [32] Organización Panamericana de la Salud (OPS), «Guías para la calidad del agua potable: Criterios relativos a la salud y otra información de base», *Publ. Científica*, 1987, Accedido: ago. 16, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/39866>.
- [33] L. S. Clescerl, A. E. Greenberg, y A. D. Eaton, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. Washington DC: American Public Health Association, Water Environment Federation: American Water Works Association (AWWA), 1999.
- [34] S. A. Rodríguez y R. Rodríguez, «La Dureza del Agua», Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Bahía Blanca, Argentina, 2010. Accedido: jun. 04, 2019. [En línea]. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza\\_agua.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf).
- [35] R. Jiménez Martínez, M. Calvo Rebollar, M. Á. Martínez Palomares, y R. Gorgues, «Yacimientos de Aragonito del triásico español», *Bocamina Rev. Miner. Yacim. Esp.*, n.º 16, pp. 30-93, 2005.
- [36] M. P. Mena, «CALIDAD DE AGUAS CI 5102-1 – DUREZA Y ESTABILIDAD DEL AGUA», Chile, Santiago, Universidad de Chile, 2013, [En línea]. Disponible en: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/CI5102/1/material\\_docente/](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/CI5102/1/material_docente/).
- [37] J. A. Romero Rojas, *Calidad del agua*, 3ra ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002.
- [38] M. A. Neira Gutiérrez, «Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de Caso: Chile», Memoria (Ingeniero Civil), Santiago. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, 2006.
- [39] American Society for Testing and Materials (ASTM), *Manual para Aguas de Usos Industriales*, 3ra ed. México: Editorial Limusa, 1976.
- [40] APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), y WEF (Water Environment Federation), *Standard methods for the examination of water and wastewater. (Methods: 2340 C. EDTA Titrimetric Method)*, 18th ed. Washington DC, 1998.
- [41] World Health Organization (WHO), «Calcium and Magnesium in Drinking-water: Public Health Significance», *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 67, n.º 4, pp. 612-613, ago. 2010, doi: 10.1080/00207230903208415.
- [42] F. Cassassuce, «Agua dura y sus efectos a la salud - Parte 2 - Cálculos Renales (piedras en riñones)», *Instituto de Tecnologías Rurales A.C. (EoZ)*, jul. 31, 2017. <https://www.agualimpia.mx/blogs/news/agua-dura-y-salud-parte-2-final> (accedido feb. 06, 2019).
- [43] F. Kožíšek, M.D., Ph.D., «Health significance of drinking water calcium and magnesium», *Natl. Inst. Public Health Czech Repub.*, feb. 2003, [En línea]. Disponible en: [https://pdfs.semanticscholar.org/1ad4/05da0bf3e231017c576b6ca7277a5ad4871d.pdf?\\_ga=2.110412097.538379294.1597772837-650561822.1597772837](https://pdfs.semanticscholar.org/1ad4/05da0bf3e231017c576b6ca7277a5ad4871d.pdf?_ga=2.110412097.538379294.1597772837-650561822.1597772837).
- [44] Institute of Medicine, *Dietary Reference Intakes for Calcium, Phosphorus, Magnesium, Vitamin D, and Fluoride*. Washington, DC: The National Academies Press, 1997.
- [45] C. Boggetti, «Minerales», *CIENCIAS DE LA TIERRA*, ene. 30, 2010. <http://cienciasdelatierra2010.blogspot.com/2009/05/minerales.html> (accedido jul. 14, 2018).
- [46] J. McCallion, F. N. Kemmer, y Nalco Chemical Company, *Manual del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*, 1ra ed., vol. Tomo III. México: McGraw-Hill, 1982.
- [47] J. Lara, «Top 9 de alimentos ricos en magnesio», *Vitónica*, dic. 11, 2016. <https://www.vitonica.com/alimentos/top-9-de-alimentos-ricos-en-magnesio> (accedido mar. 20, 2019).

- [48] S. Monarca, F. Donato, y I. Zerbin, «Drinking water hardness and cardiovascular diseases: A review of epidemiological studies 1979-2004», *Eur. J. Cardiovasc. Prev. Rehabil. Off. J. Eur. Soc. Cardiol. Work. Groups Epidemiol. Prev. Card. Rehabil. Exerc. Physiol.*, vol. 13, pp. 495-506, sep. 2006, doi: 10.1097/01.hjr.0000214608.99113.5c.
- [49] A. U. MacKinnon y S. H. Taylor, «Relationship between 'Sudden' Coronary Deaths and Drinking Water Hardness in Five Yorkshire Cities and Towns», *Int. J. Epidemiol.*, vol. 9, n.º 3, pp. 247-250, sep. 1980, doi: 10.1093/ije/9.3.247.
- [50] T. P. Flaten y B. Bølviken, «Geographical associations between drinking water chemistry and the mortality and morbidity of cancer and some other diseases in Norway», *Sci. Total Environ.*, vol. 102, pp. 75-100, feb. 1991, doi: 10.1016/0048-9697(91)90308-2.
- [51] S. J. Pocock *et al.*, «British Regional Heart Study: geographic variations in cardiovascular mortality, and the role of water quality», *Br. Med. J.*, vol. 280, n.º 6226, pp. 1243-1249, may 1980.
- [52] Y. Cy, C. Jf, C. Hf, W. Tn, L. Ch, y K. Yc, «Relationship between water hardness and coronary mortality in Taiwan.», *J. Toxicol. Environ. Health*, vol. 49, n.º 1, pp. 1-9, sep. 1996, doi: 10.1080/009841096160952.
- [53] C. Nerbrand, L. Agréus, R. A. Lenner, P. Nyberg, y K. Svärdsudd, «The influence of calcium and magnesium in drinking water and diet on cardiovascular risk factors in individuals living in hard and soft water areas with differences in cardiovascular mortality», *BMC Public Health*, vol. 3, p. 21, jun. 2003, doi: 10.1186/1471-2458-3-21.
- [54] C. Nerbrand, K. Svärdsudd, J. Ek, y G. Tibblin, «Cardiovascular mortality and morbidity in seven counties in Sweden in relation to water hardness and geological settingsThe project: Myocardial Infarction in Mid-Sweden», *Eur. Heart J.*, vol. 13, n.º 6, pp. 721-727, jun. 1992, doi: 10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a060246.
- [55] P. Sengupta, «Potential health impacts of hard water», *Int. J. Prev. Med.*, vol. 4, n.º 8, pp. 866-875, ago. 2013.
- [56] V. Bellizzi *et al.*, «Effects of water hardness on urinary risk factors for kidney stones in patients with idiopathic nephrolithiasis», *Nephron*, vol. 81 Suppl 1, pp. 66-70, 1999, doi: 10.1159/000046301.
- [57] W. M. León Hanco, «Impacto en la salud por consumo de agua dura en pobladores de la parte baja del río Chili, Arequipa, Perú», Tesis, Puno. Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Química, 2008.
- [58] Consejo de la Comunidad Europea, «Directiva 98/83/CE del Consejo relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano de 3 de noviembre de 1998 (Diario Oficial N° L 330 de 05/12/1998 p. 0032 - 0054)». España, Diario Oficial de las Comunidades Europeas, dic. 05, 1998, [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A31998L0083>.
- [59] P. A. Truque B., «Armonización de los estándares de agua potable en las Américas», *Organ. Am. State OAS*, 2005, Accedido: ago. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>.
- [60] CEPIS/OPS y OMS, «Normas internacionales para la calidad del agua de bebida», p. 13, 2005.
- [61] J. D'Étigny, «Estudio sobre la presencia de asbesto en el agua potable, aplicación a la Región Metropolitana», Memoria (Ingeniero Civil), Santiago. Universidad de Chile, Escuela Ingeniería de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1983.

- [62] Vigaflow S.A., «Mapa del Agua con Sarro en Chile», 2016. <https://vigaflowsa.blogspot.com/2016/08/mapa-del-agua-con-sarro-en-la-dureza.html> (accedido ago. 19, 2018).
- [63] Instituto Nacional de Estadísticas (INE), «Resultados CENSO 2017. Chile», *1.2 Población total por sexo y área urbana-rural, según grupos de edad*, 2018. <http://resultados.censo2017.cl/Home/Download> (accedido nov. 22, 2018).
- [64] Radio BioBioChile, «Inauguran en Alto Hospicio nueva planta de agua potable con abatimiento de arsénico», *BioBioChile - La Red de Prensa Más Grande de Chile*, nov. 05, 2013. <http://www.biobiochile.cl/noticias/2013/11/05/inauguran-en-alto-hospicio-nueva-planta-de-agua-potable-con-abatimiento-de-arsenico.shtml> (accedido ago. 27, 2018).
- [65] Instituto Nacional de Estadísticas (INE), «Datos del CENSO georeferenciados en ArcGIS», *Iniciar Sesión (acceso restringido)*. [https://inechile.maps.arcgis.com/sharing/rest/oauth2/authorize?client\\_id=arcgisonline&display=default&response\\_type=token&state=%7B%22returnUrl%22%3A%22http%3A%2F%2Ffinechile.maps.arcgis.com%2Fapps%2Fwebappviewer%2Findex.html%3Ffid%3D69596c770c714200a7bd423f40e1b46c%22%2C%22useLandingPage%22%3Afalse%7D&expiration=20160&locale=es-es&redirect\\_uri=https%3A%2F%2Ffinechile.maps.arcgis.com%2Fhome%2Faccounts%2Fswitcher-callback.html&force\\_login=false&hideCancel=true&showSignupOption=true&canHandleCrossOrgSignIn=true&signuptype=esri&redirectToUserOrgUrl=true](https://inechile.maps.arcgis.com/sharing/rest/oauth2/authorize?client_id=arcgisonline&display=default&response_type=token&state=%7B%22returnUrl%22%3A%22http%3A%2F%2Ffinechile.maps.arcgis.com%2Fapps%2Fwebappviewer%2Findex.html%3Ffid%3D69596c770c714200a7bd423f40e1b46c%22%2C%22useLandingPage%22%3Afalse%7D&expiration=20160&locale=es-es&redirect_uri=https%3A%2F%2Ffinechile.maps.arcgis.com%2Fhome%2Faccounts%2Fswitcher-callback.html&force_login=false&hideCancel=true&showSignupOption=true&canHandleCrossOrgSignIn=true&signuptype=esri&redirectToUserOrgUrl=true) (accedido feb. 02, 2019).
- [66] Instituto Nacional de Estadísticas (INE), «Censos de Población y Vivienda», *INE*. <http://www.ine.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/poblacion-y-vivienda> (accedido feb. 04, 2019).
- [67] Instituto Nacional de Normalización (Chile), «Agua Potable – Fuentes de Abastecimiento y obras de captación – Parte 1: Captación de aguas superficiales. NCh777-1.Of2008». Santiago, 2008.
- [68] Instituto Nacional de Normalización (Chile), «Agua Potable – Fuentes de Abastecimiento y obras de captación – Parte 2: Captación de aguas subterráneas. NCh777-2.Of2000». Santiago, 2000.
- [69] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Fiscalización de empresas sanitarias», *SISS*. <http://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6403.html> (accedido abr. 25, 2018).
- [70] O. Pérez F., «Métodos de enfriamiento y Control de dureza en Aguas Industriales. Aplicación a un caso práctico», Memoria (Ingeniero Civil), Santiago. Universidad de Chile, Escuela Ingeniería de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 1979.
- [71] T. de J. Valenzuela Marin, «Exploracion de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remocion de dureza que logre la optimizacion tecnica y economica del proceso», Tesis (Licenciatura en Ingeniería Química), Puebla, México. Universidad de las Américas, Escuela de Ingeniería del Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, 2004.
- [72] L. Pitaluga, M. González, y M. Fernández, «Problemática derivada del ablandamiento doméstico de aguas», España. Laboratorio del Colegio Oficial de Farmacéuticos de la Provincia de Alicante, Documento de trabajo, 2001. Accedido: abr. 29, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://www.desincal.com/desincal\\_como\\_alternativa\\_ecologica\\_al\\_descalcificador\\_tradicional.php](https://www.desincal.com/desincal_como_alternativa_ecologica_al_descalcificador_tradicional.php).

- [73] M. Zavaleta, A. Valera, E. Rivas, A. Mendoza, y S. Tinoco, «Efecto de Campo Magnético en el Tratamiento de Aguas Duras», *TECNIA*, vol. 9, n.º 1, Art. n.º 1, jun. 1998, doi: 10.21754/tecnia.v9i1.417.
- [74] L. Herrera, J. Hernández, y J. Castillo, «Optimización Preliminar de Caldera Pirotubular utilizando dispositivos magnéticos», Chile, Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. Laboratorio de Procesos de Protección Ambiental. Accedido: ago. 20, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/78697536/Estudio-Universidad-de-Chile-Petroleo>.
- [75] VULCAN, Alemania, «VULCAN. El Sistema Antical Electrónico - Fichas técnicas de Productos». <https://www.cwt-vulcan.com/es/productos/> (accedido abr. 25, 2018).
- [76] VOSGES, Italia, «VOSGES. Aceleradores Iónicos NEW ARA - Fichas técnicas de Productos». <https://www.vosges-italia.it/es/productos/aceleradores-ionicos-new-ara> (accedido abr. 25, 2018).
- [77] DESINCAL, España, «DESINCAL - Gama de Equipos», *DESINCAL*. [https://www.desincal.com/gama\\_de Equipos\\_desincal.php](https://www.desincal.com/gama_de Equipos_desincal.php) (accedido oct. 17, 2018).
- [78] DESCALCIFICADOR10 (Antical RF), «Descalcificador Antical RF - Pros y contras de este sistema antical.», *Descalcificador 10*. [https://descalcificador10.com/#comprar\\_un\\_sistema\\_antical\\_rf](https://descalcificador10.com/#comprar_un_sistema_antical_rf) (accedido abr. 17, 2018).
- [79] DESMINERALIZADORES, «Funcionamiento de los procesos industriales de desmineralización de Agua», *desminerlizadores.com*, may 02, 2011. <http://www.desmineralizadores.com/funcionamiento.html> (accedido abr. 27, 2018).
- [80] WQA, «Find Gold Seal Certified Products», *Water Quality Association*. <https://www.wqa.org/find-products#/> (accedido nov. 07, 2018).
- [81] ArcGIS, «¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center», *ArcGIS Resources*. <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm> (accedido feb. 26, 2019).
- [82] Instituto Nacional de Normalización (Chile), «Agua Potable – Producción, conducción, almacenamiento y distribución – Requisitos de diseño. NCh691.Of2015». Santiago, 2015.
- [83] «INGENIERÍA SANITARIA CIV 377 – CLASE 3 – Caudales de Diseño AP», Chile, Santiago, Universidad Técnica Federico Santa María, 2016.
- [84] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Requerimientos de información y normas - Series de Datos - SIFAC», *Superintendencia de Servicios Sanitarios*. <http://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6422.html> (accedido jun. 30, 2020).
- [85] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Tarifas», *Superintendencia de Servicios Sanitarios*. <http://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6385.html> (accedido jun. 27, 2020).
- [86] Superintendencia de Servicios Sanitarios, «Archivos SISS - Concesiones - Estudios Tarifarios», *Biblioteca Técnica - SISS*. <http://infota.siss.cl/index.html> (accedido jun. 30, 2020).
- [87] Servicio de Impuestos Internos, «Valores y Fechas - UF», *SII - Servicio de Impuestos Internos*. [http://www.sii.cl/valores\\_y\\_fechas/uf/uf2020.htm](http://www.sii.cl/valores_y_fechas/uf/uf2020.htm) (accedido jun. 30, 2020).
- [88] Ley Chile, Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, y Subsecretaría de Economía, Fomento y Reconstrucción, «Decreto 453 - Aprueba el reglamento del decreto con fuerza de ley N° 70, de 1988, del ministerio de obras públicas, que establece la fijación de tarifas de servicios de Agua Potable y Alcantarillado», *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*, ene. 17, 1990. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=98618#350> (accedido jul. 27, 2018).

- [89] A. Kresse, «INGENIERÍA SANITARIA CIV 377 – CLASE 10 – Regulación, Tarifas, MMA», Chile, Santiago, Universidad Técnica Federico Santa María, 2016.
- [90] Aguas del Altiplano S.A., «Tarifas y prestaciones no monopólicas - Tarifas Publicadas el 01 de noviembre de 2018», *Aguas del Altiplano*, nov. 01, 2018. [http://www.aguasdeltiplano.cl/p\\_238-250\\_tarifas-servicios](http://www.aguasdeltiplano.cl/p_238-250_tarifas-servicios) (accedido nov. 23, 2019).
- [91] Cámara Chilena de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, y Dirección de Bibliotecas, Archivos y Museos, *Geografía Económica de Chile - Tomo I - CORFO*, 1ra ed. Chile, Santiago: Biblioteca Fundamentos de la Construcción de Chile, 2013.
- [92] M. Sills Cifuentes, «El desierto de Atacama vivió una de las sequías más largas de las que se tiene registro: duró 400 años.», oct. 21, 2015. <https://tepresentoachil3.wordpress.com/2015/10/21/1-el-desierto-de-atacama-vivio-una-de-las-sequias-mas-largas-de-las-que-se-tiene-registro-duro-400-anos/> (accedido dic. 01, 2018).
- [93] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, «Datos de Precipitación - CR2». <http://www.cr2.cl/datos-de-precipitacion/> (accedido nov. 16, 2019).
- [94] COSAYACH, «Cosayach Compañía de Salitre y Yodo - Plantas Productivas», *Cosayach Compañía de Salitre y Yodo*. <http://www.cosayach.cl/espanol/plantas-productivas.html> (accedido ago. 22, 2019).
- [95] Fergosol Renovables, «Fontanería y Gas: Cuanta Sal consume un descalcificador doméstico», *Fontanería y Gas*, abr. 18, 2014. <http://fergosol.blogspot.com/2014/04/cuenta-sal-consume-un-descalcificador.html> (accedido ago. 16, 2018).
- [96] Homecenter Sodimac, «Sal para ablandador de agua», *SODIMAC.CL*. [https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/search/?Ntt=sal%20ablandador&sTerm=sal%20para%20ablan&sType=suggest&sScenario=BTP\\_SUG\\_sal%20ablandador](https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/search/?Ntt=sal%20ablandador&sTerm=sal%20para%20ablan&sType=suggest&sScenario=BTP_SUG_sal%20ablandador) (accedido oct. 23, 2019).
- [97] Diario Oficial (Chile), «Decreto con Fuerza de Ley N°70 de 1988 del Ministerio de Obras Públicas - Artículo 36», *Diario Oficial de la República de Chile*, jun. 02, 1995. <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/media/1995/06/02/do-19950602.pdf> (accedido jul. 27, 2018).
- [98] A. Sevilla, «Tasa interna de retorno (TIR) - Definición y ejemplos», *Economipedia*, jul. 15, 2014. <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html> (accedido nov. 18, 2019).

## 11 ANEXOS

---

### 11.1 ANEXO A; “DIVISIÓN TERRITORIAL”

Si bien la siguiente división territorial [91] nunca fue usada como entidad administrativa, y ha caído en desuso, esta agrupa de forma aceptable territorios con características geográficas, demográficas y económicas similares (delimitándolas por ríos). Así, las regiones naturales<sup>96</sup>, ordenadas de norte a sur son:

#### 1. Norte Grande;

- 1.1. Arica y Parinacota (XV Región)
- 1.2. Tarapacá (I Región)
- 1.3. Antofagasta (II Región)
- 1.4. Norte de Atacama, hasta el río Copiapó (III Región)

#### 2. Norte Chico;

- 2.1. Sur de Atacama (III Región)
- 2.2. Coquimbo (IV Región)
- 2.3. Norte de Valparaíso, hasta el río Aconcagua (V Región)

#### 3. Zona Central;

- 3.1. Sur de Valparaíso (V Región)
- 3.2. Región Metropolitana de Santiago (Región Metropolitana, RM o XIII Región)
- 3.3. Libertador General Bernardo O'Higgins (VI Región)
- 3.4. Maule (VII Región)
- 3.5. Región de Ñuble (XVI Región)
- 3.6. Región de Concepción, hasta el río Bío-bío (VIII Región)

#### 4. Zona Sur;

- 4.1. Sur de la Región de Concepción (VIII Región)
- 4.2. Araucanía (IX Región)
- 4.3. Región de los Ríos (XIV Región)
- 4.4. Norte de los Lagos, hasta el Seno de Reloncaví (X Región)

#### 5. Zona Austral;

- 5.1. Sur de los Lagos (X Región)
- 5.2. Aysén (XI Región)
- 5.3. Magallanes y de la Antártica chilena (XII Región)

Así, durante el desarrollo del trabajo de título, al mencionar el Norte, Centro y Sur de Chile, se refiere a regiones Macro Naturales, que contemplan las regiones que muestra la *Tabla 11.1*.

---

<sup>96</sup> La CORFO, en su obra “Geografía económica de Chile”, distingue seis regiones naturales, pero a modo de simplificación las regiones CORFO llamadas “Concepción y La Frontera” y “Región de los Lagos”, se agrupan en la región natural “Zona Sur”, y la “Región de los Canales” se denomina como la región natural “Zona Austral”. Dejando así, solo cinco regiones naturales.

Tabla 11.1: Clasificación de regiones de Chile, utilizada durante el desarrollo de la memoria de título.

Región		
Macro Natural	Natural	Administrativa
Norte	Norte Grande	XV
		I
		II
	Norte Grande - Norte Chico	III
	Norte Chico	IV
Centro	Norte Chico - Zona Central	V
	Zona Central	RM
		VI
		VII
		XVI
	Zona Central - Zona Sur	VIII
Sur	Zona Sur	IX
		XIV
	Zona Sur - Zona Austral	X
	Zona Austral	XI
		XII

## 11.2 ANEXO B; “ESCALA DE EVALUACIÓN”

La escala de evaluación utilizada en dicha sección, corresponde a la mostrada por la *Tabla 11.2*:

Tabla 11.2: Escala de evaluación utilizada por la encuesta "Percepción de clientes de la calidad de servicio de las empresas sanitarias 2016".

Pésimo	Muy malo	Malo	Menos que regular	Aceptable	Muy bueno	Excelente	No sabe/No responde
1	2	3	4	5	6	7	8

## 11.3 ANEXO C; “CÁLCULO ISN”

La satisfacción neta del servicio de agua potable, se obtiene mediante el cálculo del Índice de Satisfacción Neta (ISN) de manera genérica y para cada uno de los criterios evaluados, considerando la escala de evaluación de 1 a 7, mostrada, según la ecuación (11.1).

$$ISN = \% \text{ Clientes Satisfechos (notas 6 y 7)} - \% \text{ Clientes Insatisfechos (notas } \leq 4) \quad (11.1)$$

## 11.4 ANEXO D; “DETALLE CATASTRO DE DUREZA, MEMORIA M. NEIRA”

Tabla 11.3: Concentraciones de dureza total en Chile, calcio y magnesio, en cuanto a sus promedios, máximos y mínimos regionales.

Región	Dureza Total [mg/l] de CaCO <sub>3</sub>		Calcio [mg/l] de CaCO <sub>3</sub>			Magnesio [mg/l] de CaCO <sub>3</sub>		
	Máx.	Mín.	Promedio	Máx.	Mín.	Promedio	Máx.	Mín.
XV y I	658,66	11,53	110,52	216,00	2,16	17,87	34,18	0,28
II	474,31	266,64	96,72	174,32	66,40	24,17	32,50	9,50
III	880,93	270,64	182,19	273,28	90,02	38,73	62,25	11,15
IV	1236,85	135,71	143,48	428,63	36,13	34,54	69,05	11,05
V	569,27	150,30	81,20	195,45	34,96	16,22	40,50	7,50
RM	996,99	122,10	133,91	354,66	39,53	16,09	80,80	5,30
VI	367,03	92,88	60,95	127,99	22,53	10,78	22,09	0,30
VII	201,66	6,52	24,38	59,03	0,98	7,43	14,90	0,99
XVI y VIII	247,91	5,59	14,29	75,66	0,67	4,84	21,12	0,40
IX	100,96	3,45	8,94	21,44	0,28	3,98	13,95	0,67
XIV y X	144,27	3,72	11,30	29,96	0,75	3,73	16,87	0,45
XI	130,42	3,40	14,49	40,49	0,82	2,40	7,13	0,33
XII	120,76	56,19	30,08	42,75	17,11	6,46	21,80	1,65

## 11.5 ANEXO E; “SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ADA”

### 11.5.1 Aguas del Altiplano Arica

La ciudad de Arica se ubica a ambos lados del río San José, en la terraza fluvio-costera limitada por el mar hacia el poniente. Más al norte también escurre el río Lluta que conforma el Valle del mismo nombre, cuyas aguas son salobres. Arica tiene agua y vegetación, caso único en el norte, incluso del Perú. Las condiciones de un clima desértico costero, con alta nubosidad y escasa oscilación térmica diaria imperantes, y las características del suelo, determinan una precaria disponibilidad hídrica.

La ciudad se extiende hacia el interior del valle de Azapa en lo que respecta a su parte más meridional, y donde el crecimiento de la ciudad se desarrolla básicamente hacia las faldas del cordón de cerros del sur, del oriente y también, en forma más acelerada, hacia el norte. Cerca de Arica se extiende el Valle de Azapa, cuyo cauce corresponde al Río San José, un oasis en el desierto donde se cultivan hortalizas y aceitunas.

El clima de la zona es desértico costero, caracterizado por nublados abundantes, baja oscilación y amplitud térmica en otoño, invierno y la parte inicial de la primavera; lo que cambia en verano, cuando las temperaturas llegan a duplicarse y la oscilación aumenta. En materia climatológica, Arica es una de las ciudades más secas del mundo por sus casi nulas

precipitaciones<sup>97</sup>, lo cual es reflejado en su normal anual de 0,92 [mm] de agua caída (según datos públicos de precipitaciones desde 1974 a 2017 [93]).

Según los datos recolectados en el Censo del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), la comuna de Arica posee una superficie de 4.799 [km<sup>2</sup>] y una población estimada por el INE para el 2017 de 221.364 habitantes, de los cuales 111.975 son mujeres y 109.389 son hombres, acogiendo al 97,92% de la población total de la región [63].

En lo que a AP se refiere, la producción al año 2013 se abastece principalmente de las fuentes Subterráneas ubicadas en las cercanías de la ciudad de Arica, particularmente de tres grandes:

1. La cuenca del Río San José en el Valle de Azapa.
2. Las fuentes del sector ciudad, ubicadas en la parte baja de la cuenca del Río San José, antes de su desembocadura al mar.
3. La cuenca del Río Lluta en el Valle del Lluta.

Dichos sectores de fuentes para producción de AP, se encuentran ubicados geográficamente según la imagen satelital presentada en la Imagen 11.1, y se detallan a continuación.



Imagen 11.1: Fotografía satelital de la posición geográfica de sectores de producción del sistema AP Arica. Fuente: Google Maps.

## 1. Valle de Azapa:

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| 1.1. Sistema Valle de Azapa: | 28 Captaciones Subterráneas (12 en operación).    |
| 1.2. Sistema Ciudad:         | 10 Captaciones Subterráneas (todas en operación). |

<sup>97</sup> Si bien, el desierto de Atacama, en la Región de Antofagasta, es el más árido del mundo, las Regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá (anteriormente unidas como la I Región), ostentan el récord de la sequía más larga de la historia desde que existen registros, en donde durante 4 siglos, entre 1571 y 1971, no hubo precipitación alguna [92].

### 1.3. Sistema Costero Dulce<sup>98</sup>: 3 Captaciones Subterráneas (todas en operación<sup>99</sup>).

El acuífero del valle de Azapa en Arica, es utilizado para fines agrícolas, industriales y de agua potable. Dado el aumento en la explotación en los últimos años, la Dirección General de Aguas (DGA) ha declarado cerrado el valle para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento.

En general, la salinidad de los pozos aumenta a medida que éstos se ubican más cerca del mar, mejorando su calidad cuando se alejan de la ciudad hacia el interior del valle. Por otra parte, la profundidad tipo de los sondajes del Valle de Azapa varía entre los 90 y los 100 metros, obteniendo el agua que es conducida por más de 30 [km] de aducciones de diferentes materiales, cuyo diámetro fluctúa entre los 150 y 450 [mm].

En la actualidad no todos los pozos cumplen con la normativa de calidad de agua potable establecida en la NCh409Of.2005, por lo que es necesario mezclar las aguas más salobres con las más dulces para alcanzar los límites establecidos para los parámetros de cloruros y sólidos disueltos totales (SDT). Sin embargo, existe un grupo de fuentes en la parte alta e interior del Valle de Azapa cuya mezcla cumple la normativa vigente y puede ser entregada a distribución directamente para la demanda actual.

## 2. Valle del Lluta:

### 2.1. Sistema Valle de Lluta: 13 Captaciones Subterráneas (todas en operación). Captación superficial del Río Lluta.

El acuífero del valle del río Lluta también se utiliza para fines agrícolas, industriales y de agua potable. Las aguas de la cuenca del río Lluta, presentan índices de cloruros y sólidos disueltos por sobre el valor de la norma, que hacen necesario su tratamiento mediante el proceso de osmosis inversa, antes de ser distribuida para consumo humano. La profundidad media de los sondajes es de 130 [m], cuyas aguas son trasladadas a una Planta de Tratamiento de Desalación a través de una recolectora de 11 [km] de longitud.

Cabe mencionar que la Planta Desalinizadora Lluta, operada por la empresa “Desalari”, funciona mediante Osmosis Inversa y tiene una capacidad instalada de 206 [l/s]. Las aguas tratadas (permeadas) son conducidas al estanque Chuño y a la PEAP Estadio, donde se mezcla con el agua de los sondajes de menor calidad del valle de Azapa y de la ciudad.

El agua captada en el valle de Lluta se transporta hasta la ciudad a través de una aducción de 20 [km] de longitud y 600 [mm] de diámetro.

Así, al 2013 existen 6 puntos de entrega para distribución, referentes a los estanques:

- Punto n°1: Estanques Cerro la Cruz

---

<sup>98</sup> Tres sondajes ubicados en la ciudad, en el margen sur del lecho del río San José, previa desembocadura al mar.

<sup>99</sup> Datos de operación según la producción de Agua Potable 2016, obtenida de las Nuevas Bases de Infraestructura (NBI) de dicho año, facilitadas por la empresa Aguas Nuevas.

- Punto n°2: Recinto Estanques Chuño
- Punto n°3: Recinto Estanques Saucache
- Punto n°4: Recinto Estanques Pampa Nueva
- Punto n°5: Recinto Estanques Morro
- Punto n°6: Recinto Estanque Pago de Gómez

Cabe mencionar que el PD del año 2013 no hace referencia a proyectos futuros de puntos de entrega para distribución. Luego, el agua recolectada en los estanques mencionados, es distribuida hacia distintos sectores de la ciudad, abasteciendo de agua potable a todos los habitantes de Arica.

La forma de distribución para los distintos sectores de presión de la ciudad, se realiza mediante variadas mezclas de aguas, en donde, por ejemplo, el Estanque Chuño recibe aguas provenientes del Valle del Lluta, Azapa y Costero Dulce, y en cambio los estanques Pago de Gómez, Saucache y Pampa Nueva, solo recolectan aguas provenientes del Valle de Azapa. Además, los sistemas de distribución reciben, en su mayoría, aguas provenientes de dos o más estanques. La Figura 11.1, muestra un diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución de Aguas Potables, a gran escala, del servicio existente para la localidad de Arica.

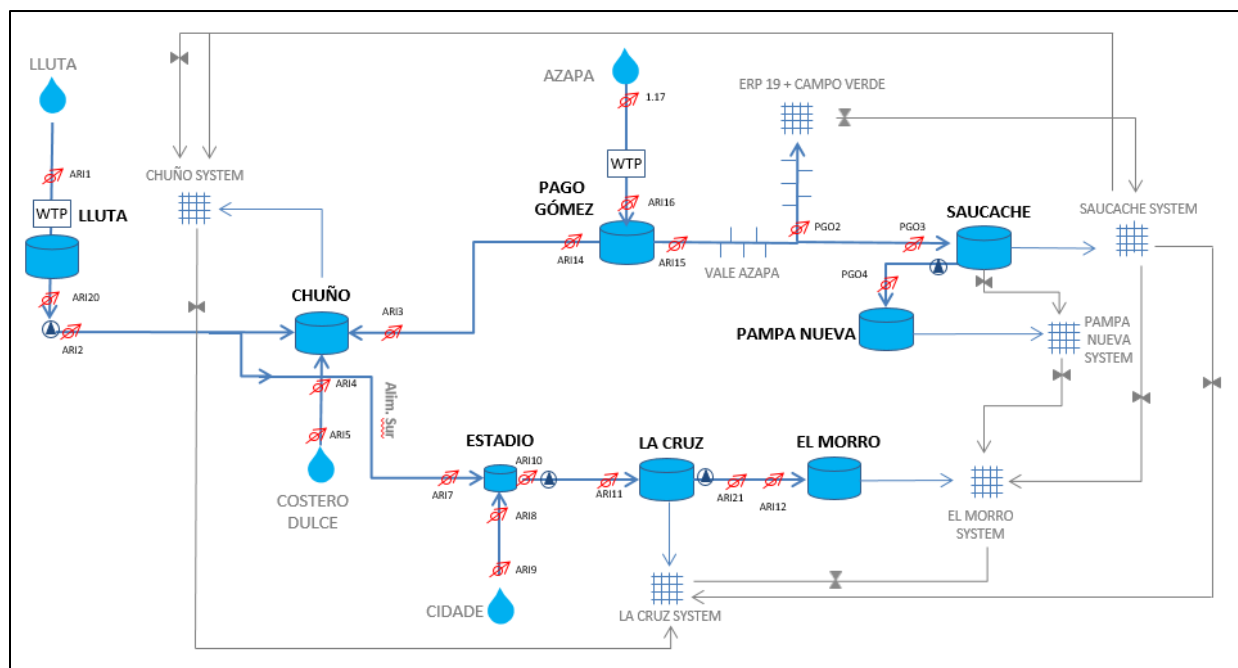


Figura 11.1: Diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de Arica, donde los cilindros hacen referencia a recintos de estanques, los rectángulos WTP son PTAP, los círculos con triángulos azules en el centro son PEAP, las gotas son sectores de producción de AP, y los enrejados son los distintos sistemas de distribución. Fuente: Elaboración de ADA.

### 11.5.2 Aguas del Altiplano Iquique

La ciudad de Iquique es un balneario marítimo ubicado en el sector poniente central de la Región de Tarapacá, un gran centro pesquero y el mayor puerto mundial exportador de harina de

pescado, así como un gran centro comercial debido a la Zona Franca, además de ser el principal centro de servicio de la industria de la minería del cobre y no metálica presente en la región.

Iquique es la capital de la comuna y provincia del mismo nombre y de la Región de Tarapacá. Por su situación geográfica, presenta un clima desértico costero normal, con nublados abundantes de franca uniformidad anual; poca oscilación térmica, camanchacas<sup>100</sup> matinales y un régimen de precipitaciones extremadamente bajas. Se encuentra a 1.843 [km] al norte de Santiago, y a 302 [km] al sur de Arica (distancias por la Ruta 5).

La localidad se encuentra dividida en dos zonas claramente diferenciadas: en el borde costero, se encuentra la ciudad de Iquique propiamente tal e inmediatamente al interior y a 339 [msnm], la comuna de Alto Hospicio, que ha experimentado un desarrollo importante y sostenido, en los últimos años.

La ciudad misma se encuentra en una terraza costera limitada por el mar en el poniente, y hacia el oriente, por una verdadera pared montañosa de fuerte pendiente que constituye el borde poniente de la meseta superior en la que se ubica Alto Hospicio. Dicho accidente topográfico margina el crecimiento de la ciudad hacia el nororiental debido a que comienza paulatinamente a acercarse al mar impidiendo la implementación de nuevas urbanizaciones. En cambio, el sector sur de la ciudad presenta mayores posibilidades de expansión, debido a sus características físicas más uniformes.

Según los datos recolectados en el Censo del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), la comuna de Iquique posee una superficie de 2.242 [km<sup>2</sup>] y una población estimada por el INE para el 2017 de 191.468 habitantes, de los cuales 96.571 son mujeres y 94.897 son hombres, acogiendo al 57,92% de la población total de la región [63].

El sistema de producción de AP de Iquique, al año 2013, se abastece exclusivamente de captaciones subterráneas, las que se ubican en la Pampa del Tamarugal, a más de 60 [km] al oriente de la ciudad. Existen dos grandes sistemas de producción que abastecen a la ciudad de Iquique, denominados Canchones y El Carmelo, y cuyas aguas convergen en la localidad de Alto Hospicio, en el estanque del mismo nombre, luego de desplazarse a través de grandes conducciones que cruzan buena parte de la Pampa del Tamarugal, como se muestra en la Imagen 11.2 . Cabe señalar que las aguas captadas en el sistema de Canchones, una vez que abastecen a la localidad de La Huayca y Alto Hospicio, quedan con excedentes, los que son conducidos hacia Iquique.

---

<sup>100</sup> Camanchaca: f. Bol., Chile y Perú. Niebla espesa y baja.



Imagen 11.2: Fotografía satelital de la posición geográfica de sectores de producción del sistema AP Iquique. Fuente: Google Maps.

Las captaciones El Carmelo y Canchones, ubicadas en la Pampa del Tamarugal, están constituidas por grupos de sondajes de gran profundidad<sup>101</sup>, cuyas aguas son elevadas y trasladadas hacia la costa por medio de dos tuberías de hierro dúctil paralelas entre si y distantes del orden de 35 [km] entre ellas: una de 78 [km] de longitud que va desde El Fundo El Carmelo hasta los estanques Alto Hospicio y luego a Cavancha. La otra de 72 [km] que va desde Canchones hasta el estanque Santa Rosa en Alto Hospicio.

Para el año 2013, el sistema de producción El Carmelo consta de 8 sondajes, y Canchones se compone de 11, todos ellos en operación según la producción de AP del 2016, presentada por en la NBI. Cabe mencionar que, desde la aducción El Carmelo se abastece también la cárcel de Alto Hospicio (a la altura de los estanques Toro 2) y la localidad de Pozo Almonte (a la altura de la PEAP del mismo nombre, mostrada por la *Imagen 11.2*).

Por otra parte, desde la aducción Canchones, además, se alimenta a la localidad de La Huayca, al sector de Cumiñalla (junto a 3 sondajes que aportan a la aducción), donde existe un número importante de clientes históricos conectados a la aducción, y a la Planta Soledad (productora de yodo y nitrato, de la empresa Cosayach<sup>102</sup>) a la altura de los estanques Rinconada. Cabe mencionar que, desde Canchones mismo, se abastece el sector de riego de Nueva Almería.

<sup>101</sup> En promedio, los sondajes de El Carmelo captan aguas a 200 [m] de profundidad, y en Canchones, varían entre los 95 y los 120 [m] de profundidad.

<sup>102</sup> Cosayach se ha convertido en el segundo productor de Yodo y Nitratos a nivel mundial [94].

Por las condiciones topográficas de la pampa del Tamarugal, caracterizada por una gran planicie de baja pendiente hacia el sur poniente, en ambas conducciones se requiere elevar el agua captada para remontar la diferencia de cota que impone la estructura geológica de la cordillera de la costa, después de la cual recién se inicia el descenso fuerte hacia la línea de costa.

Así, la conducción El Carmelo eleva las aguas desde la Planta elevadora El Carmelo hasta los estanques Santa Laura en un trayecto de 18 [km], mientras que en la conducción Canchones se impulsa desde la planta elevadora Diana hasta el estanque Rinconada en un trayecto de 3 [km].

En términos generales, la operación actual del sistema de producción – distribución está separada en dos grandes sectores:

1. Alto Hospicio: abastecido desde el estanque Santa Rosa, y alimentado desde la aducción Canchones.
2. Iquique: abastecido desde el Estanque Alto Hospicio, punto final de la aducción El Carmelo y donde se mezcla con las aguas excedentes del Estanque Santa Rosa (provenientes de Canchones).

A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de estos sistemas:

### **1. Sistema de producción El Carmelo:**

El sistema El Carmelo, construido entre 1997 y 1998, se ubica en la hoya de la Pampa del Tamarugal y consta de 8 sondajes con una profundidad promedio cercana a los 200 metros cada uno.

El agua extraída de estos sondajes, si bien es de buena calidad en general, presenta concentraciones de sulfatos que puntual y esporádicamente exceden la norma actual de calidad de agua potable definida en 500 [mg/l]. Asimismo, la concentración de arsénico alcanza valores del orden de 0,01 [mg/l], establecido como máximo admisible en la citada Norma, [8] para el año 2016.

El agua producida es almacenada en los dos Estanques Elevados El Carmelo (recinto El Carmelo Elevado), que le dan la carga suficiente al sistema para transportar el agua, por medio de una tubería de hierro dúctil de 18,8 [km] de largo y 900 [mm] de diámetro, a través de la planicie del sector oriente de la Pampa del Tamarugal hasta la PTAP El Carmelo, en las cercanías de Pozo Almonte.

En dichas instalaciones, las aguas luego de ser tratadas, son almacenadas en dos estanques semienterrados de 2.000 [m<sup>3</sup>] de capacidad cada uno, que permiten abastecer a las localidades de Iquique y Pozo Almonte en forma separada, a través de la PEAP El Carmelo y la PEAP Pozo Almonte, respectivamente. Además, aquí al agua le es adicionado flúor, de acuerdo a las recomendaciones de la autoridad de salud.

Para conducir las aguas hacia Iquique, la PEAP El Carmelo las impulsa a través de una conducción de hierro dúctil de 18 [km] de longitud y 800 [mm] de diámetro hacia los Estanques

Santa Laura. Estos se encuentran ubicados en el punto más elevado del trazado y están formados por dos unidades de 2.000 [m<sup>3</sup>] de capacidad cada una.

Desde ese punto nace una nueva conducción gravitacional de hierro dúctil, de 15,6 [km] de longitud, dividida en dos tramos (de 2,4 y 13,2 [km] de longitud, y de 800 y 600 [mm] de diámetro, respectivamente), hasta llegar a los estanques Toro 1, correspondientes a dos unidades de 500 [m<sup>3</sup>] de capacidad cada una.

Posteriormente, la conducción continua, entre los estanques Toro 1 ya indicados y los estanques Toro 2, que corresponden también a dos unidades de 500 [m<sup>3</sup>] de capacidad cada una, a través de una tubería de hierro dúctil de 2,6 [km] de longitud y 600 [mm] de diámetro.

Finalmente existe una aducción de hierro dúctil, de 7,2 [km] de longitud y 600 [mm] de diámetro, entre los estanques Toro 2 y los dos estanques Alto Hospicio, de 5.000 [m<sup>3</sup>] y 2.000 [m<sup>3</sup>] de capacidad.

Actualmente, en el recinto Toro 2 anteriormente descrito, se efectúa la inyección de Cloro en la derivación de alimentación a la Cárcel de Alto Hospicio, de manera de cumplir con los requisitos de calidad establecidos en la normativa vigente. El resto de la cloración para el agua potable de Iquique se efectúa en el recinto de los estanques Alto Hospicio y la recloración en los estanques Cavanca.

Finalmente, en el recinto Estanques Alto Hospicio, punto final de la aducción El Carmelo, sus aguas se mezclan con las excedentes de uno de los estanques Santa Rosa (provenientes de Canchones).

## **2. Sistema de Producción Canchones:**

El sistema Canchones, ubicado también en la hoya de la Pampa del Tamarugal, está constituido por 11 sondajes (8 en las cercanías de la localidad de La Huayca y 3 en el sector de Cumiñalla), con una profundidad promedio cercana a los 110 metros cada uno.

La mayoría de estos sondajes presenta problemas de calidad de agua en lo referente a las concentraciones de manganeso y principalmente arsénico. Lo anterior, ha llevado a independizar los sondajes de mejor calidad de manera de permitir el abastecimiento directo desde estas unidades a la localidad de La Huayca, pasando previamente por la pequeña PTAP de filtros La Huayca y luego por una cloración.

Así, la producción obtenida de estas captaciones de menor calidad es conducida hasta los dos estanques Canchones, de 1.000 [m<sup>3</sup>] de capacidad cada uno, ubicados en el mismo recinto de los sondajes, desde los cuales es impulsada hacia el recinto Diana, por medio de la PEAP Canchones, y a través de dos conducciones, Canchones – Diana Antigua, de 29,7 [km] de longitud, y dividida en dos tramos (acero, 27,0 [km], 600 [mm] y hierro dúctil, 2,7 [km], 700 [mm]), y Canchones – Diana Nueva, de 29,9 [km] de longitud, en hierro dúctil y de 800 [mm] de diámetro. A lo largo de estas conducciones se incorporan las producciones de los 3 sondajes del Sector de Cumiñalla,

además de que en dicho sector se abastecen a clientes históricos conectados directamente a la aducción.

La planta Diana cuenta con dos estanques semienterrados, desde los cuales el agua es nuevamente impulsada hasta el recinto Rinconada, por medio de la PEAP Diana, a través de una conducción de hierro dúctil, 3,0 [km] de longitud, y 800 [mm] de diámetro.

Desde Rinconada, el punto más alto del sistema y consistente de dos estanques semienterrados, la producción de Canchones es conducida hasta el recinto Estanques Santa Rosa (que cuenta con dos unidades de 5.000 y 10.000 [m<sup>3</sup>] de capacidad), a través de una tubería de hierro dúctil, dividida en dos tramos de 26,7 [km] y 600 [mm] de diámetro, y 5,9 [km] de longitud y 450 [mm] de diámetro. A lo largo de dicha tubería, se conecta el abastecimiento a la Planta Soledad.

Finalmente, en el recinto de estanque Santa Rosa<sup>103</sup>, parte de la producción de Canchones, permite abastecer a la localidad de Alto Hospicio, mientras que el remanente es conducido hasta los estanques Alto Hospicio (descritos en el sistema de producción El Carmelo), a través de una conducción de hierro dúctil, de 6,7 [km] de longitud y 450 [mm] de diámetro. En este recinto, al agua proveniente de Santa Rosa se le adiciona Cloro.

Cabe mencionar que el agua producida en la Sistema Canchones cuenta naturalmente con niveles adecuados de flúor, por lo que no es necesario adicionar este elemento en ninguno de sus tramos.

Así, desde los estanques Alto Hospicio, el agua para Iquique es conducida hasta el recinto de regulación estanques Cavancha por medio de dos conducciones denominadas Bajada Alto Hospicio – Cavancha Antigua y Bajada Alto Hospicio – Cavancha Nueva, ambas de acero, de 3,0 [km] de longitud y 400 [mm] de diámetro, y 2,8 [km] de longitud y 700[ mm] de diámetro, respectivamente, las cuales vencen el desnivel geométrico existente entre la alta meseta de Alto Hospicio y la ciudad de Iquique, del orden de 400 [m].

Desde el recinto Cavancha (principal centro de regulación de la ciudad, compuesto por 7 estanques) se regula el abastecimiento del sector centro – norte de la ciudad. Mientras que los estanques Chipana, Las Dunas y Huantajaya abastecen sectores altos de la ciudad, el estanque Seccional Sur abastece el sector sur de la ciudad.

Así, desde el recinto Cavancha, y mediante una PEAP, se impulsan las aguas que abastecen a los estanques Las Dunas y Huantajaya. Por otra parte, desde el recinto estanques Alto Hospicio, se abastece el estanque Chipana, por medio de un ramal de la aducción Alto Hospicio - Cavancha. A su vez, desde Chipana nace una aducción que abastece a los estanques Seccional Sur, que permiten

---

<sup>103</sup> En el PD se menciona la puesta en funcionamiento, durante 2013, de una PTAP de abatimiento de Arsénico en dicho recinto, para asegurar el estándar de calidad dado el aumento de la demanda en el tiempo.

la regulación de la red del sector Sur de la ciudad y sirve de cabecera para la alimentación de la aducción Sur que se desarrolla hasta el Aeropuerto, tal y como lo muestra la Figura 11.2.

Desde los estanques de regulación mencionados, el agua es finalmente distribuida a la ciudad por una red de alimentadoras y matrices con una longitud total estimada superior a 375 [km], cuyos diámetros fluctúan entre los 75 [mm] y los 600 [mm], abasteciendo a una población de más de 190.000 habitantes [63]. Cabe mencionar que, los estanques Alto Hospicio operan como cabecera del sistema de estanques de distribución de Iquique, otorgando seguridad adicional al sistema de abastecimiento.

La Figura 11.2, muestra un diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución de Aguas Potable, del servicio existente para la localidad de Iquique, en conjunto con Alto Hospicio, Pozo Almonte y La Huayca, y otros puntos de distribución, dada su configuración.

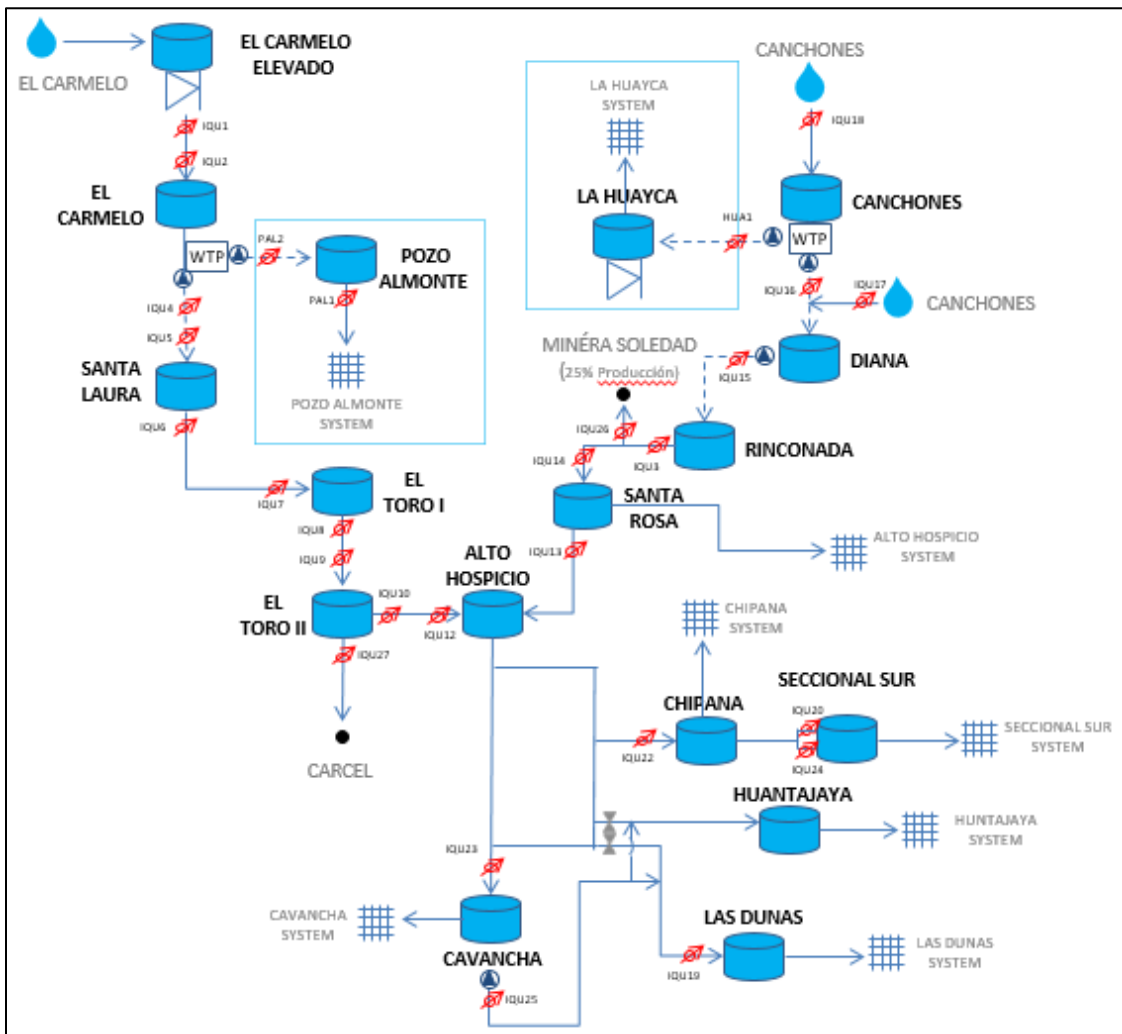


Figura 11.2: Diagrama de flujo del proceso de Producción, Almacenamiento y Distribución del AP de Iquique, Alto Hospicio Pozo Almonte y La Huayca, donde los cilindros hacen referencia a recintos de estanques, los rectángulos WTP son PTAP, los círculos con triángulos azules en el centro son PEAP, las gotas son sectores de producción de AP, y los enrejados son los distintos sistemas de distribución. Fuente: Elaboración de Aguas del Altiplano.

## 11.6 ANEXO F; “PROYECCIONES DE POBLACIÓN”

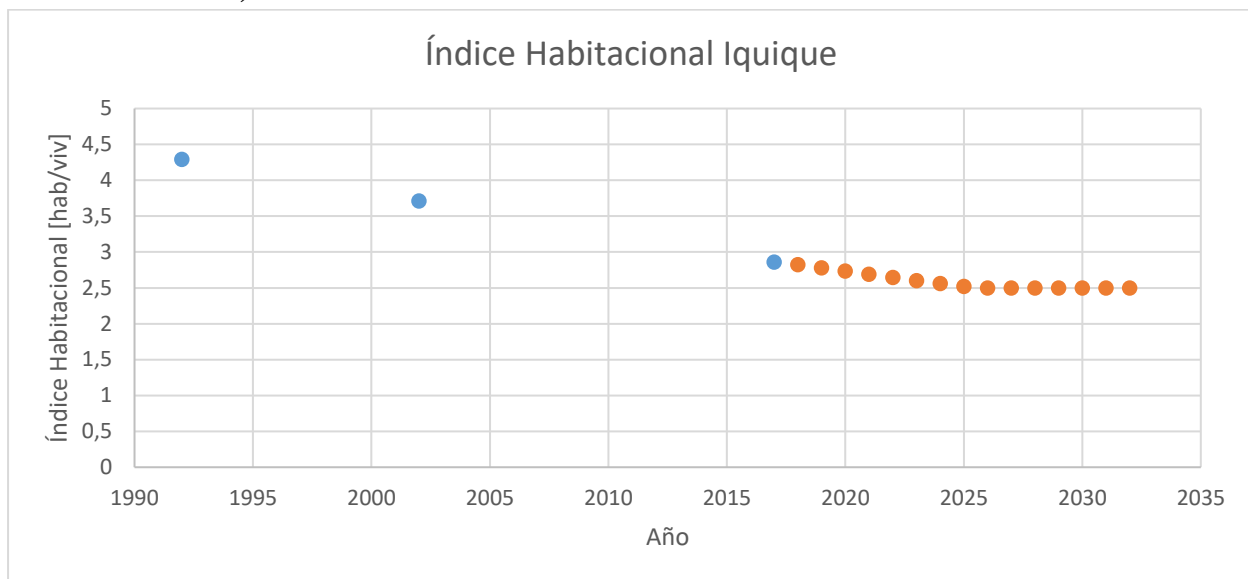


Gráfico 11.1: Índices habitacionales de la localidad de Iquique, calculados con data histórica de la base de datos del INE, en azul. En naranja se muestra la proyección realizada al índice, para los años del horizonte de diseño.

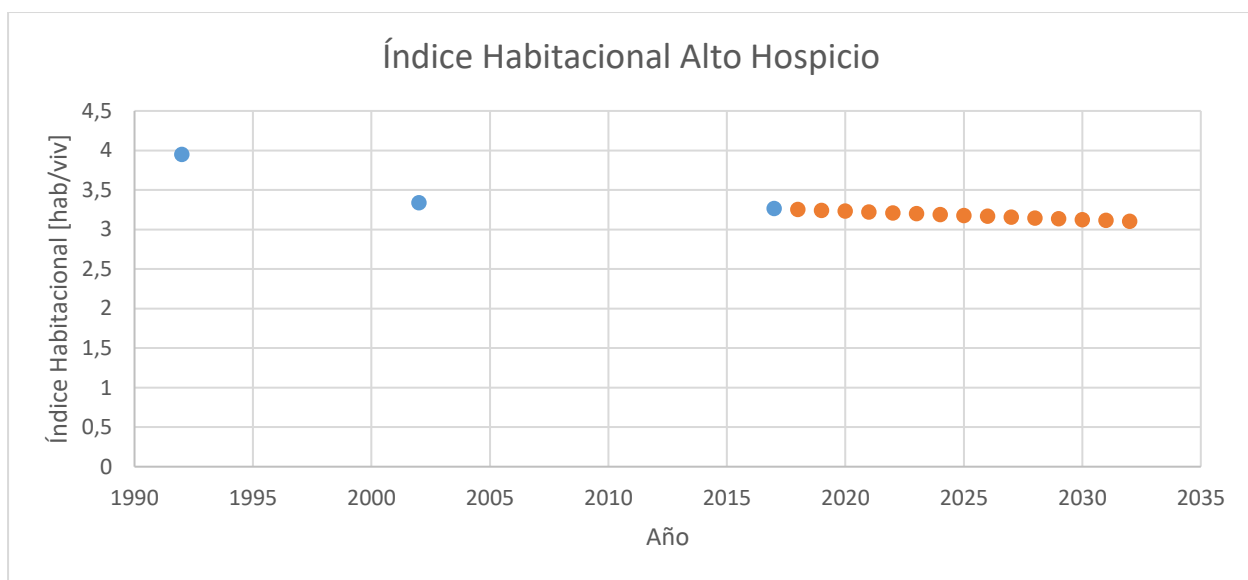


Gráfico 11.2: Índices habitacionales de la localidad de Alto Hospicio, calculados con data histórica de la base de datos del INE, en azul. En naranja se muestra la proyección realizada al índice, para los años del horizonte de diseño.

Tabla 11.4: Proyecciones de Clientes y Población abastecida, para cada una de las localidades, y también para la totalidad del sistema IQQ-AH en estudio.

Año	Año de estudio	Clientes Abastecidos			Población Abastecida		
		Iquique	Alto Hospicio	Sistema IQQ-AH	Iquique	Alto Hospicio	Sistema IQQ-AH
		[cliente]	[cliente]	[cliente]	[hab]	[hab]	[hab]
0	2017	60.748	28.775	89.523	173.637	93.992	267.629
1	2018	62.546	29.385	91.931	176.593	95.650	272.243
2	2019	64.397	30.008	94.405	178.876	97.339	276.215
3	2020	66.303	30.644	96.947	181.188	99.059	280.247
4	2021	68.266	31.294	99.560	183.531	100.811	284.342
5	2022	70.287	31.957	102.244	185.904	102.595	288.499
6	2023	72.367	32.635	105.002	188.308	104.412	292.720
7	2024	74.509	33.327	107.836	190.742	106.264	297.006
8	2025	76.715	34.033	110.748	193.208	108.149	301.358
9	2026	78.985	34.755	113.740	197.463	110.070	307.533
10	2027	81.323	35.491	116.815	203.308	112.026	315.334
11	2028	83.730	36.244	119.974	209.326	114.019	323.345
12	2029	86.209	37.012	123.221	215.522	116.049	331.571
13	2030	88.761	37.797	126.557	221.902	118.117	340.018
14	2031	91.388	38.598	129.986	228.470	120.223	348.693
15	2032	94.093	39.416	133.509	235.233	122.369	357.601

### 11.7 ANEXO G; “ISN%, DUREZA Y PRECIO”

En el Gráfico 11.3, se muestra la misma comparación que en el Gráfico 3.2, pero dejando solamente el aspecto peor evaluado a nivel nacional, que es el precio.

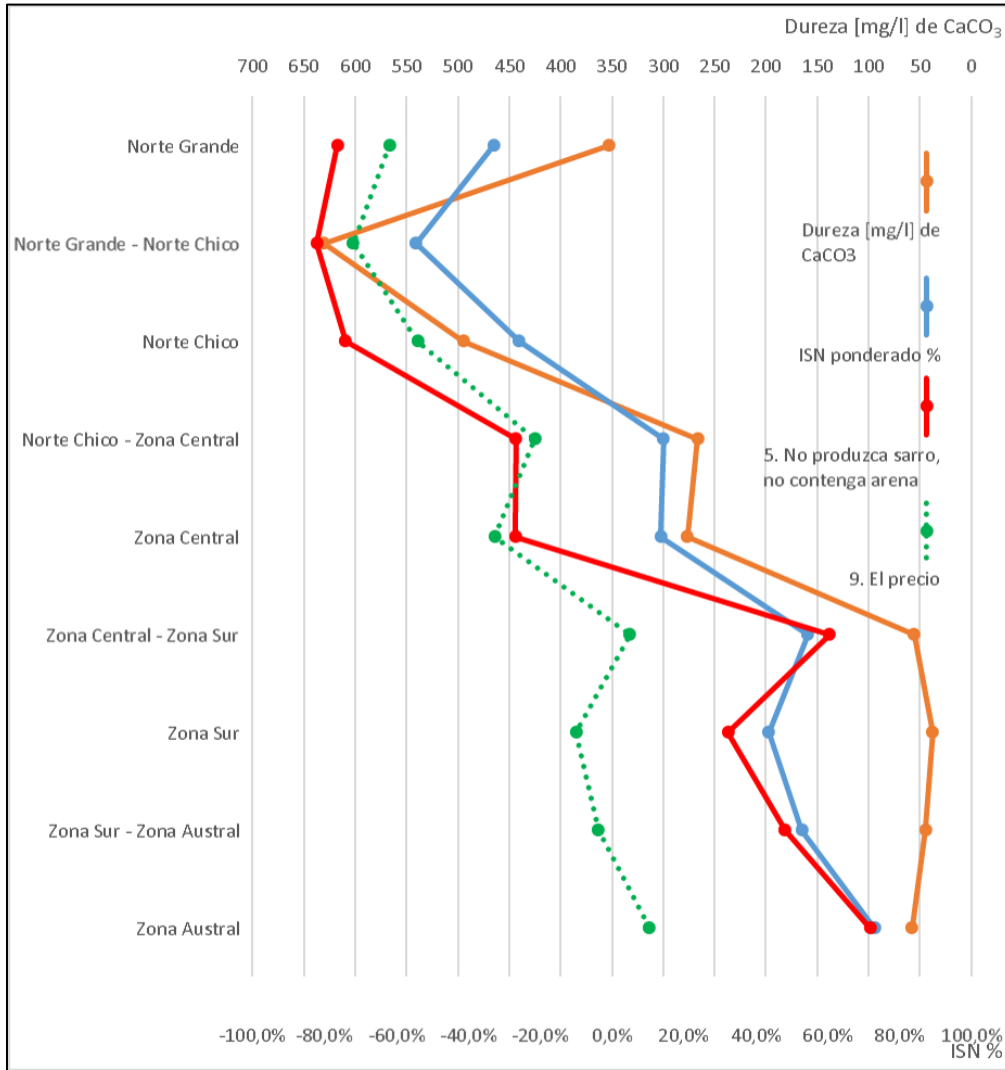


Gráfico 11.3: Distribución de la concentración de dureza, del índice de satisfacción neta; ponderado y solo del precio, para cada una de las regiones naturales. El eje del ISN% se encuentra “girado”. Fuente: Elaboración Propia.

En el reciente gráfico, se observa que el precio es muy determinante de la forma del ISN% ponderado, y que en el Norte de Chile (con durezas mayores a 250 [mg/l de CaCO<sub>3</sub>]), la presencia del sarro (o arena), es incluso más insatisfactoria para el usuario que el precio.

### 11.8 ANEXO H; “CALIDAD DEL AGUA CRUDA – XV REGIÓN”

A continuación, se muestran la calidad del Agua Cruda de los sondeos de los distintos sectores de captación, del sistema de AP de Arica, según los promedios de las mediciones históricas entre los años 2001 y 2011 (se muestra el boro, que si bien no está presente la normativa, si posee un máximo para aguas de riego y otros usos [25], de 2,4 [mg/l].):

Tabla 11.5: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes del **Valle de Azapa**, en la XV Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.

Fuente	Sulfatos [mg/l]	Cloruros [mg/l]	Hierro [mg/l]	Manganeso [mg/l]	Nitratos [mg/l]	SDT [mg/l]	Arsénico [mg/l]	Boro [mg/l]
Sond. 1472 San Miguel Azapa	342,81	404,44	0,07	0,04	27,28	1711,7	0,01	0,95
Sondaje 184	575,00	2184,21	0,1	0,05	29,62	5858	0,01	
Sond. 491 Azapa, Nuevo	423,13	731,34	0,09	0,06	12,35	2592,48	0,02	1,21
Sond. 492, Azapa	364,11	433,35	0,07	0,04	8,83	1849,84	0,01	1,42
Sond. Angelmo	489,57	448,12	0,08	0,04	23,2	2006,03		0,61
Sond. Cabuza 1	276,28	258,72	0,28	0,04	6,68	1282,77	0,02	1,01
Sond. Cabuza 2	351,06	315,37	0,08	0,04	13,73	1477,9		0,6
Sond. Carbone 1	303,50	389,65	0,07	0,04	3,66	1613,08		1,22
Sond. Carbone 2	296,44	333,41	0,07	0,04	3,19	1495,96		0,72
Sond. Carbone 3	339,17	504,1	0,1	0,04	6,14	1946,08	0,01	1,1
Sond. La Rivera	315,63	408,5	0,09	0,05	3,41	1713		
Sond. Las Maitas	419,63	587,24	0,07	0,04	4,24	2318,13	0,01	0,82
Sond. Mejido Fabres	340,64	337,31	0,15	0,04	2,13	1574,93		0,64
Sond. Ortuño	316,50	350,07	0,07	0,04	2,56	1542,74		0,83
Sond. Pago Gomez 1	311,63	333,83	0,08	0,04	5,32	1584,8		0,83
Sond. Pago Gomez 2	323,81	345,78	0,24	0,04	3,09	1586,67		1,01
Sond. Pago Gomez 3	320,81	343,36	0,1	0,04		1675,75		0,99
Sond. San Jose	259,38	766,25	0,13	0,04		2485,94		0,97
Sond. 1471, San Miguel de Azapa	311,00	346,63	0,09	0,04		1610,66	0,01	1,1
Sond. 491 Antiquo, Planta Azapa	304,74	369,92	0,08	0,04		1578,26	0,42	

Sond. Ordoñez 1	374,63	647,92	0,09	0,05		2342,88		1,56
Sond. Ordoñez 2	375,88	650,13	0,11	0,05		2334		1,8
Azapa 47	414,00	1565,75				3834	0,01	
Azapa 48	757,33	3389,85				7872	0,01	
Cabuza 3	279,00	352,3				1500	0,01	
Lido Carbone						1780,67		
Lido Carbone 3						1524,5		
Sondaje Cabuza 3						1437,33		
Sondaje Lido Carbone 2						1532,44		
Sondaje Lido Carbone 4	333,00	401,16				1753,33		
Sondaje Lido Carbone 5	245,00	260,32		0,05		1336	0,02	

Tabla 11.6: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes **Costero dulce**, en la XV Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.

Fuente	Sulfatos [mg/l]	Cloruros [mg/l]	Hierro [mg/l]	Manganeso [mg/l]	Nitratos [mg/l]	SDT [mg/l]	Arsénico [mg/l]	Boro [mg/l]
Sond. Chapiquiña	387,75	433,61	2,838	0,04		1699,54		1,26
Sond. Lauca 6-A	296,71	335,64	0,11	0,04		1543,82		1,32
Sond. Lauca 1/Tucapel	317,88	312,4	0,08	0,04		1470,51		

Tabla 11.7: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes **Ciudad**, en la XV Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.

Fuente	Sulfatos [mg/l]	Cloruros [mg/l]	Hierro [mg/l]	Manganeso [mg/l]	Nitratos [mg/l]	SDT [mg/l]	Arsénico [mg/l]	Boro [mg/l]
Sond. Daniel Copaja	378,79	476,79	0,23	0,05		1953,3	0,01	0,64
Sond. Liga de Empleados	234,63	413,64	0,09	0,04		1623,1		
Sond. Los Pinos	445,62	512,73	0,08	0,05		2051,56		0,78
Sond. Pilon 18 Septiembre	430,93	479	0,13	0,04		2082,59		0,76
Sond. Retén Estadio	478,44	1170,72	0,08	0,04		2847,34		1,48

Sond. Rodoviario	336,57	604,15	0,09	0,04		2372,29		
Sond. Saucache	399,5	633	0,1	0,05		2380,5		
Sond. Tucapel	328,29	371,69	0,08	0,04		1652,17		0,52

Tabla 11.8: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes **Valle del Lluta**, en la XV Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.

Fuente	Sulfatos [mg/l]	Cloruros [mg/l]	Hierro [mg/l]	Manganeso [mg/l]	Nitratos [mg/l]	SDT [mg/l]	Arsénico [mg/l]	Boro [mg/l]
Sond. Lluta 16	973,32	874,77	0,07	0,42		3297,3		25,78
Sond. Lluta 18-A	945,83	916,76	0,09	2,22		3436,94		26,2
Sond. Lluta 10	880,68	997,24	1,13	1,68		3885,54		27,6
Sond. Lluta 1-A	985,81	917,74	0,09	0,06		3425,8		25,3
Sond. Lluta 20	900,46	815,81	0,34	1,61		3177,62		21,41
Sond. Lluta 23	701,34	859,01	2,68	1,28		3457,5		30,69
Sond. Lluta 26	1039,17	951,5	1,98	1,54		3893,33		
Sond. Lluta 3	887,85	849,55	0,39	0,1		3457,37		25,33
Sond. Lluta 5	770,28	784,16	2,74	3,11		2942,71		21,18
Lluta 16-B	828,89	728,97				2816		
Lluta 26	977,33	859,29		0,97		3303,11		
Sondaje Lluta 13A	1023,11	925,81		0,48		3532,89		
Sondaje Lluta 18-B	954,56	854,39		0,51		3263,56		

## 11.9 ANEXO I; “CALIDAD DEL AGUA CRUDA – I REGIÓN”

A continuación, se muestran la calidad del Agua Cruda de los sondeos de los distintos sectores de captación, del sistema de AP de Iquique, según los promedios de las mediciones históricas entre los años 2001 y 2011:

Tabla 11.9: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes **Carmelo**, en la I Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.

Fuente	Sulfatos [mg/l]	Cloruros [mg/l]	Hierro [mg/l]	Manganeso [mg/l]	Nitratos [mg/l]	SDT [mg/l]	Arsénico [mg/l]
El Carmelo N°1	442	102		0,05		1024	0,009
El Carmelo N°2	453	117		0,047		1075	0,012

El Carmelo N°4	426	147		0,048		1087	0,012
El Carmelo N°8	495	232		0,048		1351	0,01
El Carmelo N°9	523	247		0,048		1457	0,01
El Carmelo N°11	539	243		0,048		1482	0,009
El Carmelo N°12	526	235		0,048		1494	0,013
El Carmelo N°17	532	248		0,05		1523	0,011
A	526	235		0,048		1494	0,013
B	532	248		0,05		1523	0,011
4A	421	151		0,05		1166	0,012
17A	537	252		0,05		0	0,012

Tabla 11.10: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes **Canchones**, en la I Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.

Fuente	Sulfatos [mg/l]	Cloruros [mg/l]	Hierro [mg/l]	Manganeso [mg/l]	Nitratos [mg/l]	SDT [mg/l]	Arsénico [mg/l]
Sondaje N°1	426	140		0,269		1127	0,072
Sondaje N°2	296	125		0,075		707	0,076
Sondaje N°3	275	89		0,131		779	0,092
Sondaje N°4	248	87		0,038		687	0,084
Sondaje N°5	267	91		0,044		770	0,078
Sondaje N°6	246	92		0,046		724	0,048
Sondaje N°7	260	107		0,05		787	0,031
Sondaje D	713	175		2,663		1400	0,026
Sondaje E	532	143		1,581		1231	0,049
Sondaje F	251	93		0,661		629	0,066
Sondaje G	274	87		0,85		737	0,095
Sondaje H	484	113		2,356		1131	0,044
Sondaje I	566	133		2,195		1223	0,088

Tabla 11.11: Concentraciones de algunos parámetros controlados por la normativa de calidad de AP chilena, presentes en las aguas de las fuentes **Cumiñalla**, en la I Región. De destaca en color rojo, aquellas concentraciones superiores a las normadas.

Fuente	Sulfatos [mg/l]	Cloruros [mg/l]	Hierro [mg/l]	Manganeso [mg/l]	Nitratos [mg/l]	SDT [mg/l]	Arsénico [mg/l]
Sondaje A	413	117		1,288		933	0,038
Sondaje 493 DIESEL	432	113		1,168		1056	0,029
Sondaje 494	405	120		0,47		1017	0,032
Sondaje 495	526	121		0,082		1144	0,025

## 11.10 ANEXO J; “LOCALIDADES CATASTRADAS CON DUREZA”

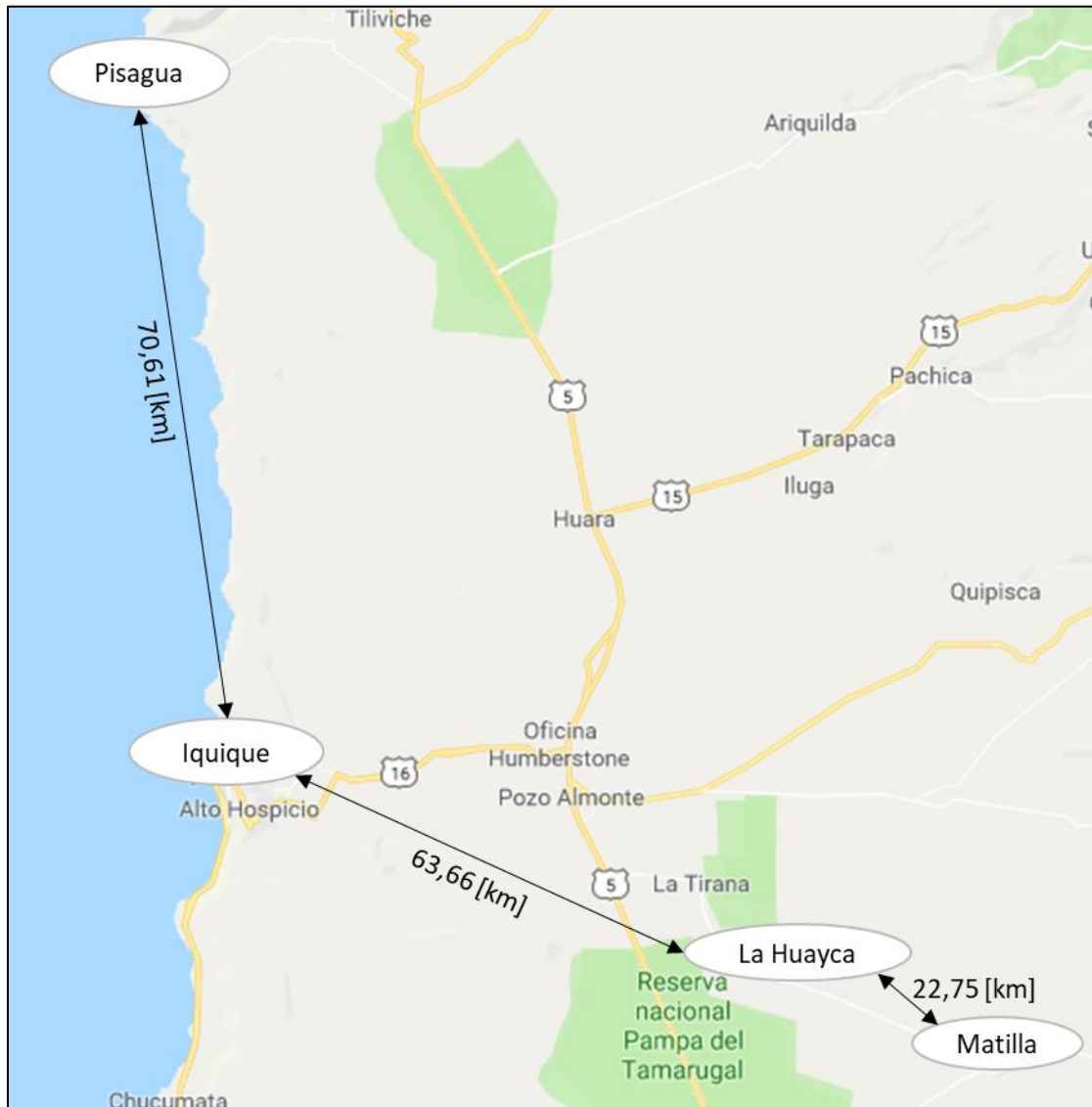


Figura 11.3: Esquema ilustrativo de las distancias entre las localidades catastradas con dureza, en la Región de Tarapacá. Fuente del mapa: [www.maps.google.cl](http://www.maps.google.cl). Elaboración propia del esquema.

Así, la heterogeneidad de las concentraciones de dureza se puede deber a las características particulares de cada fuente de extracción, para producción de agua potable, tal y como se presenta a continuación:

- 1) **Iquique**: Abastecido desde el Estanque Cavanha, luego de pasar por el Estanque Alto Hospicio, punto final de la aducción El Carmelo (sondajes provenientes de sector de captación homónimo, en la Pampa del Tamarugal, recorriendo 78 [km] de tubería desde el oeste) y de mezcla con las aguas excedentes del estanque Santa Rosa, en Alto Hospicio (sondajes provenientes de sector de captación Canchones, que recorre 72 [km] de tubería desde el oeste, pero 35 [km] al sur del sector El Carmelo, también en la Pampa del Tamarugal).

- 2) La Huayca: Abastecida de los 2 sondajes de mejor calidad de agua cruda, del sector de captación Canchones, desde el estanque de regulación “Estanque elevado La Huayca”, ubicado en el mismo sector de captación, y a tan solo 4,1 [km] de la localidad.
- 3) Matilla: Abastecida, en conjunto con la localidad de Pica, de las captaciones subterráneas localizadas en Chintaguay en la Quebrada de Quisma, las que corresponden a un pozo surgente y un dren cuyas aguas son captadas mediante un sistema de cámaras. Para el abastecimiento de Matilla se utilizan los excedentes del Pozo Surgente Chintaguay, las aguas del Dren Chintaguay (que se desarrolla a lo largo de la Quebrada de Quisma) y las aguas captadas en el Socavón Santa Rosita.
- 4) Pisagua: Abastecida mediante 2 sondajes, ubicados en el sector de Dolores, a un costado de la antigua estación de Ferrocarril de la localidad de Dolores, ubicada a 40 km al norte de Huara por la ruta 5 Norte y a 14 km al sur de la Quebrada Tiliviche (ver Figura 11.3).

## 11.11 ANEXO K; “CATASTRO DE DUREZA EN IQUIQUE”

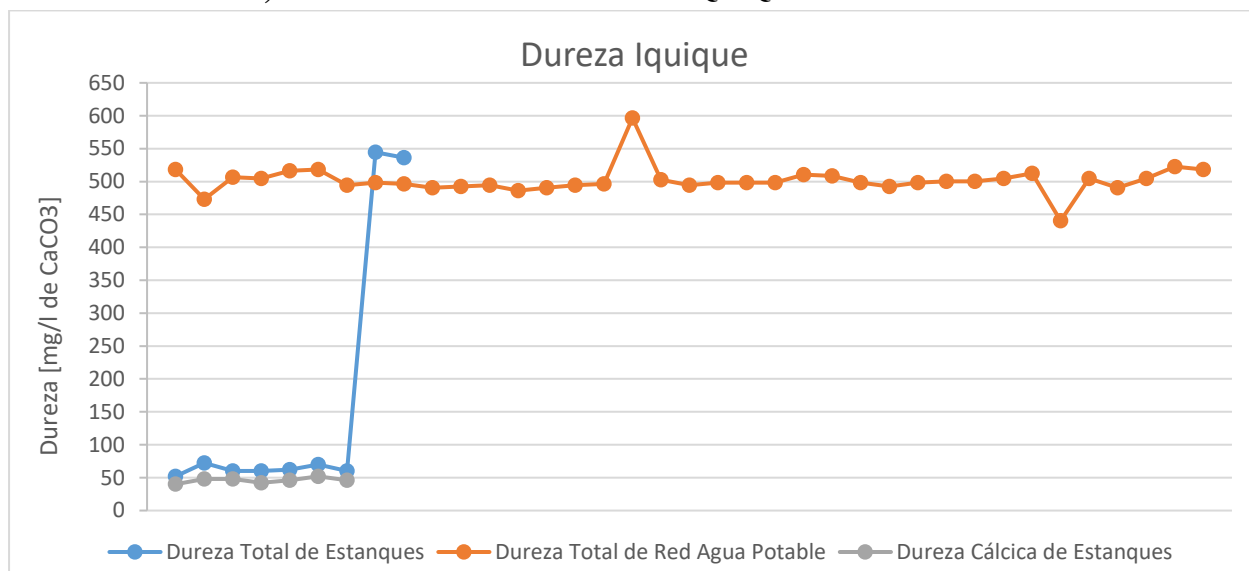
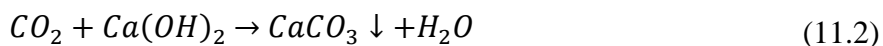


Gráfico 11.4: Concentraciones de dureza total y cálcica, diferenciando el tipo de punto de muestreo, para la localidad de Iquique.

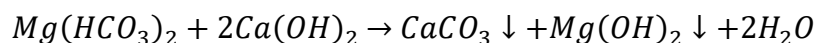
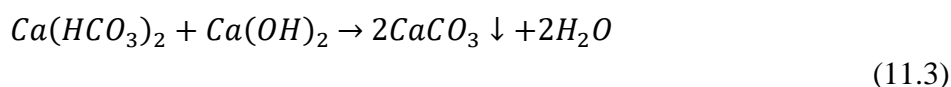
## 11.12 ANEXO L; “REACCIONES QUÍMICAS DE PROCESOS ABLANDADORES”

### 11.12.1 Precipitación con Cal

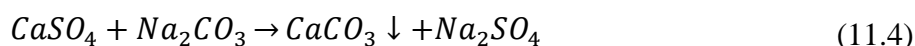
La Cal reacciona con el dióxido de carbono formando carbonato de calcio insoluble, el que precipita de acuerdo a la reacción que muestra la ecuación (11.2).



Luego, la remoción del  $CO_2$  produce un aumento del pH y predispone al bicarbonato de calcio y magnesio para pasar a carbonatos insolubles. Además, la propia Cal reacciona con los bicarbonatos de calcio y magnesio según las reacciones de la ecuación (11.3).



Como se menciona anteriormente, la dureza permanente se puede remover mediante la adición de Soda, el que reacciona con las sales de la dureza formando compuestos insolubles, tal y como presenta la reacción de la ecuación (11.4).

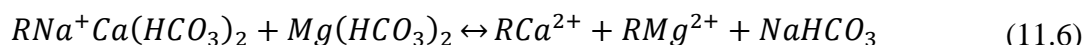


En cuanto a la recarbonatación genera con el agua, ácido carbónico, el que al disociarse permite recuperar la acidez natural del agua, de acuerdo a la reacción presentada por la ecuación (11.5).

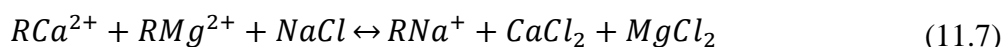


### 11.12.2 Intercambio iónico

En la ecuación (11.6) se representa esquemáticamente la reacción de intercambio iónico.



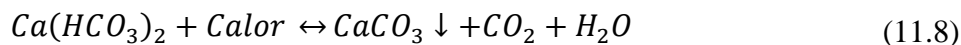
En cuanto a la regeneración, se hace comúnmente aplicando a la resina una solución concentrada de cloruro de sodio, que revierte el proceso y devuelve el calcio y magnesio en forma de cloruros, siguiendo la reacción que muestra la ecuación (11.7).



Así, el proceso de regeneración de la resina de intercambio genera todo el calcio y magnesio retenido en forma de cloruros y, además, descarga cantidades importantes del cloruro de sodio no asimilados en el proceso.

### 11.12.3 Evaporación-condensación

La reacción involucrada es la representada por la ecuación (11.8).



## 11.13 ANEXO M; “PROYECCIÓN DE DEMANDA”

Por normativa NCh691.Of2015 [82] para una correcta proyección de demanda, es necesario la obtención del consumo medio o dotación de consumo, definido como:

*Consumo promedio anual de agua potable por habitante, expresado en [litros/habitante/día] (l/hab/día), medido a la salida del estanque de regulación.*

Así, se establecen las dotaciones residenciales de un sistema, como lo muestran las ecuaciones (11.9) y (11.10), referentes a la Dotación de Consumo (Dc), y a la Dotación de Producción (Dp), respectivamente.

$$Dc = \frac{\text{Volumen anual de Agua Facturado}}{365 [\text{días}] \times N^{\circ} \text{ Habitantes}} [l/hab/día] \quad (11.9)$$

$$Dp = \frac{\text{Volumen anual de Agua Producido}}{365 [\text{días}] \times N^{\circ} \text{ Habitantes}} [l/hab/día] \quad (11.10)$$

Cabe mencionar, que la dotación producción de agua potable penderá de las pérdidas que existan entre el punto de captación y el punto de distribución. Es por esto que dichas pérdidas, referidas como “Agua no contabilizada” (ANC) y expresadas en porcentaje, se relacionan con la Dotación de Consumo, tal y como muestra la ecuación (11.11).

$$Dp = \frac{Dc}{1 - \frac{ANC}{100}} \quad (11.11)$$

Sin embargo, las empresas sanitarias normalmente no disponen de la información actualizada de los habitantes atendidos, por lo que en la práctica se utiliza otro indicador de dotación, relacionado con la facturación mensual por cada cliente en [metros cúbicos/cliente/mes] ( $m^3$ /cliente/mes), determinada según la ecuación (11.12).

$$Dc = \frac{\text{Volumen anual de Agua Facturado}}{12 [\text{meses}] \times N^{\circ} \text{ Clientes}} [m^3/cliente/mes] \quad (11.12)$$

Luego, es necesario realizar una proyección de las dotaciones de consumo, para cada una de las localidades en estudio. Así, para el año 0 de la proyección, la dotación de consumo se calcula según los datos de clientes y facturaciones mensuales de cada localidad, del año 2017, presentadas por la SIFAC<sup>104</sup>, tal y como muestra ecuación (11.13).

$$\begin{aligned} Dc_{\text{año } 0} &= \text{Promedio anual de las dotaciones de consumo mensuales del 2017} \\ Dc_{\text{año } 0} &= \frac{\sum_{i=1}^{i=12} \frac{\text{Facturación}_{\text{mes } i} [m^3]}{\text{Clientes}_{\text{mes } i} [\text{cliente}]} }{12} [m^3/cliente/mes] \end{aligned} \quad (11.13)$$

<sup>104</sup> Recoge la información de facturación [ $m^3$ /año] de agua potable y de aguas servidas de clientes regulados por empresa sanitaria y localidad; distingue entre facturación a clientes residenciales, comerciales, industriales, institucionales y no asociados a inmueble.

A continuación, la proyección de las dotaciones de consumo para el resto de los años proyectados (año 1 al 15), se realiza siguiendo la misma tendencia lineal dada por las dotaciones de consumo anuales anteriores (calculadas según la ecuación (11.14)), con los datos mensuales históricos de la SIFAC desde enero de 2015 a diciembre de 2017, de cada localidad en particular.

$$\begin{aligned} & \text{Facturación promedio mensual}_{\text{año } i \text{ anterior}} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^{j=12} \text{Facturación}_{\text{mes } j} [\text{m}^3]_{\text{año } i}}{12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Clientes promedio mensual}_{\text{año } i \text{ anterior}} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^{j=12} \text{Clientes}_{\text{mes } j} [\text{cliente}]_{\text{año } i}}{12} \end{aligned} \tag{11.14}$$

$$Dc_{\text{año } i \text{ anterior}} = \frac{\text{Facturación promedio mensual}_{\text{año } i \text{ anterior}}}{\text{Clientes promedio mensual}_{\text{año } i \text{ anterior}}}$$

Dichas tendencias lineales de las dotaciones de consumo de años anteriores, se muestran en las ecuaciones (11.15) y (11.16), y en conjunto con la proyección de dotaciones de consumo por localidad, se presentan el Gráfico 11.5 y el Gráfico 11.6, para Iquique y Alto Hospicio, respectivamente.

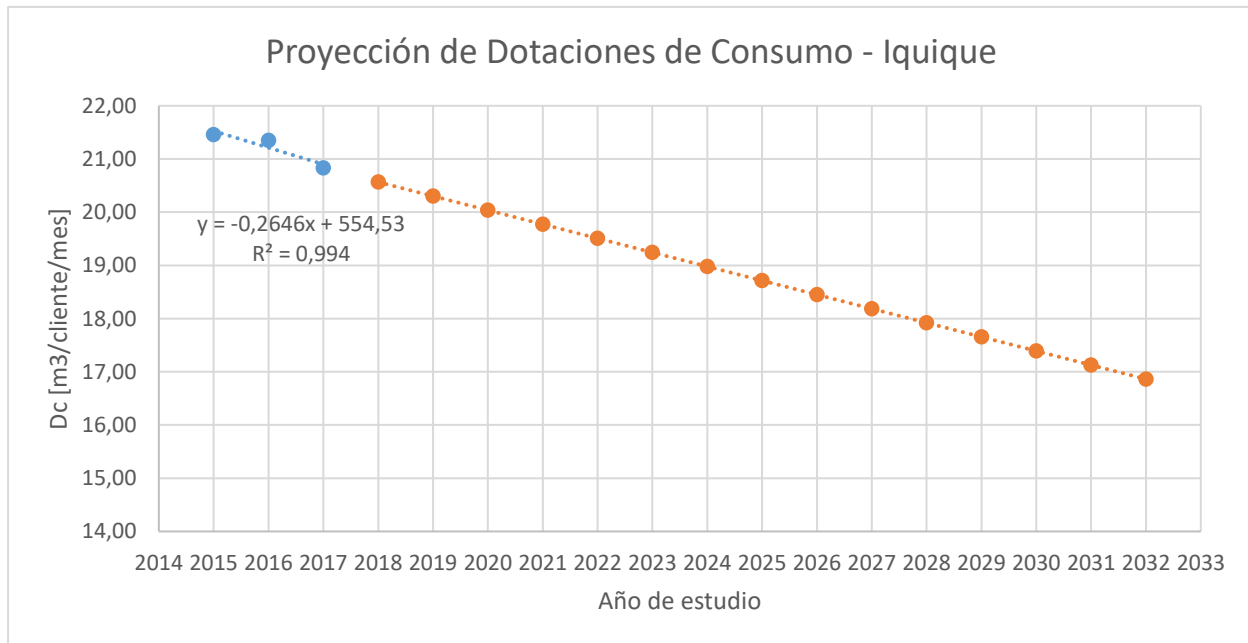


Gráfico 11.5: Dotaciones de consumo de los años 2015, 2016 y 2017, con su tendencia lineal respectiva, para la localidad de Iquique. Además, se muestran las dotaciones de consumo proyectadas para los próximos 15 años, según la tendencia lineal presentada en la ecuación (11.15).

$$Dc_{Iquique} = -0,2646 x \text{ Año}_i + 554,53 \tag{11.15}$$

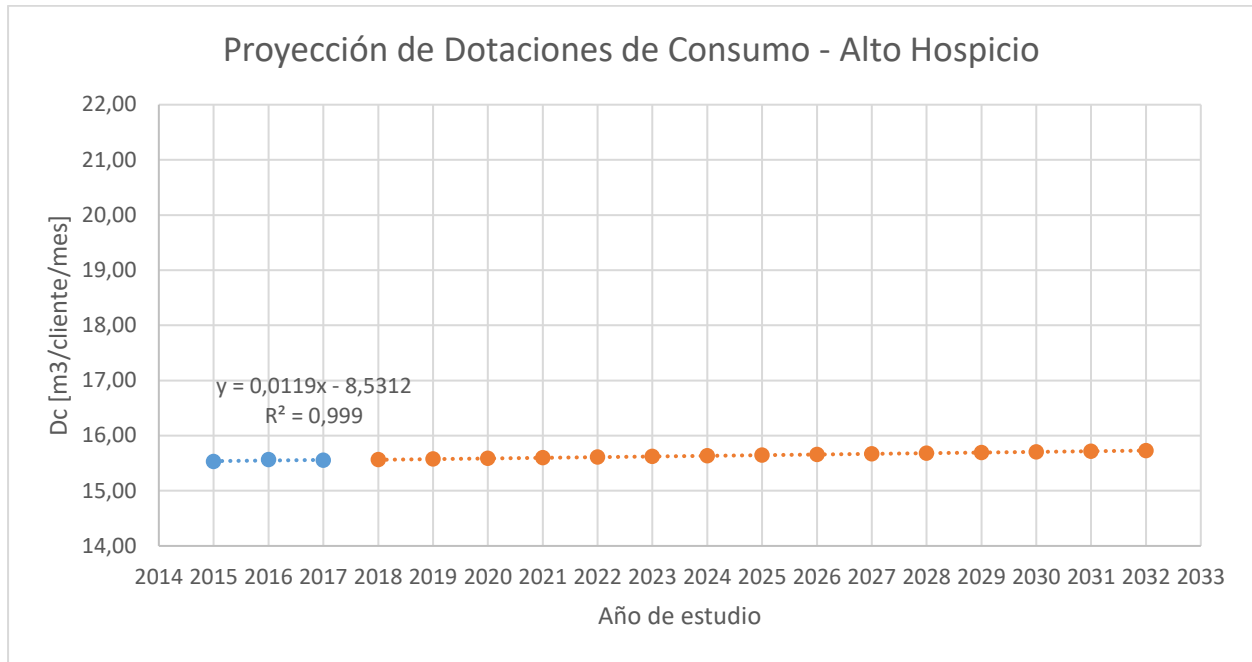


Gráfico 11.6: Dotaciones de consumo de los años 2015, 2016 y 2017, con su tendencia lineal respectiva, para la localidad de Alto Hospicio. Además, se muestran las dotaciones de consumo proyectadas para los próximos 15 años, según la tendencia lineal presentada en la ecuación (11.16).

$$Dc_{Alto\ Hospicio} = 0,0119 \times Año_i - 8,5312 \quad (11.16)$$

Obtenidas las proyecciones de dotaciones de consumo de cada localidad en estudio, se procede a determinar los caudales de consumo medios anuales, según la ecuación (11.17).

$$Q_{c_{medio\ año\ i}} \left[ \frac{l}{s} \right] = \frac{\mathbf{Clientes}_{año\ i} [\mathbf{cliente}] \times Dc_{año\ i} \left[ \frac{m^3}{\mathbf{cliente\ x\ mes}} \right] \times 12 \left[ \frac{\mathbf{mes}}{\mathbf{año}} \right] \times 1000 \left[ \frac{\mathbf{litro}}{m^3} \right]}{365 \left[ \frac{\mathbf{día}}{\mathbf{año}} \right] \times 24 \left[ \frac{\mathbf{hora}}{\mathbf{día}} \right] \times 3600 \left[ \frac{\mathbf{segundo}}{\mathbf{hora}} \right]} \quad (11.17)$$

$$Q_{c_{medio\ año\ i}} \left[ \frac{l}{s} \right] = \frac{\mathbf{Facturación\ Proyectada} \left[ \frac{m^3}{\mathbf{año}} \right]}{31536 \left[ \frac{s}{\mathbf{año}} \right] \left[ \frac{m^3}{l} \right]}$$

Tal y como muestra la ecuación (11.17), es necesario determinar la cantidad de clientes anuales por localidad, para los años proyectados. Así, para el año 0 de la proyección, la cantidad de clientes se calcula como el promedio de los clientes mensuales de cada localidad, del año 2017, presentadas por la SIFAC II<sup>105</sup>, tal y como muestra ecuación (11.18).

<sup>105</sup> El SIFAC II aglutina información del servicio que entregan las empresas sanitarias en el territorio chileno, siendo la base para la determinación de la demanda actual de AP urbana. Además, el sistema SIFAC II recoge

$$Clientes_{año 0} = \frac{\sum_{i=1}^{i=12} Clientes_{mes i}[cliente]}{12} \quad (11.18)$$

A continuación, la proyección de los clientes anuales para el resto de los años proyectados (año 1 al 15), se realiza manteniendo las tasas de crecimiento anual de años anteriores (presentadas en la Tabla 11.12), de cada localidad, quedando las proyecciones de clientes como lo muestra el Gráfico 11.7 y el Gráfico 11.8, según las ecuaciones (11.19) y (11.20), respectivamente.

Tabla 11.12: Tasas de crecimiento anual de clientes, para cada una de las localidades de estudio, según la información de los Planes de Desarrollo vigentes, en los cuales se utilizan estas tasas, y se asumen constantes en el tiempo.

Tasas de Crecimiento	
Anual de Clientes	
Iquique	Alto Hospicio
2,96%	2,12%

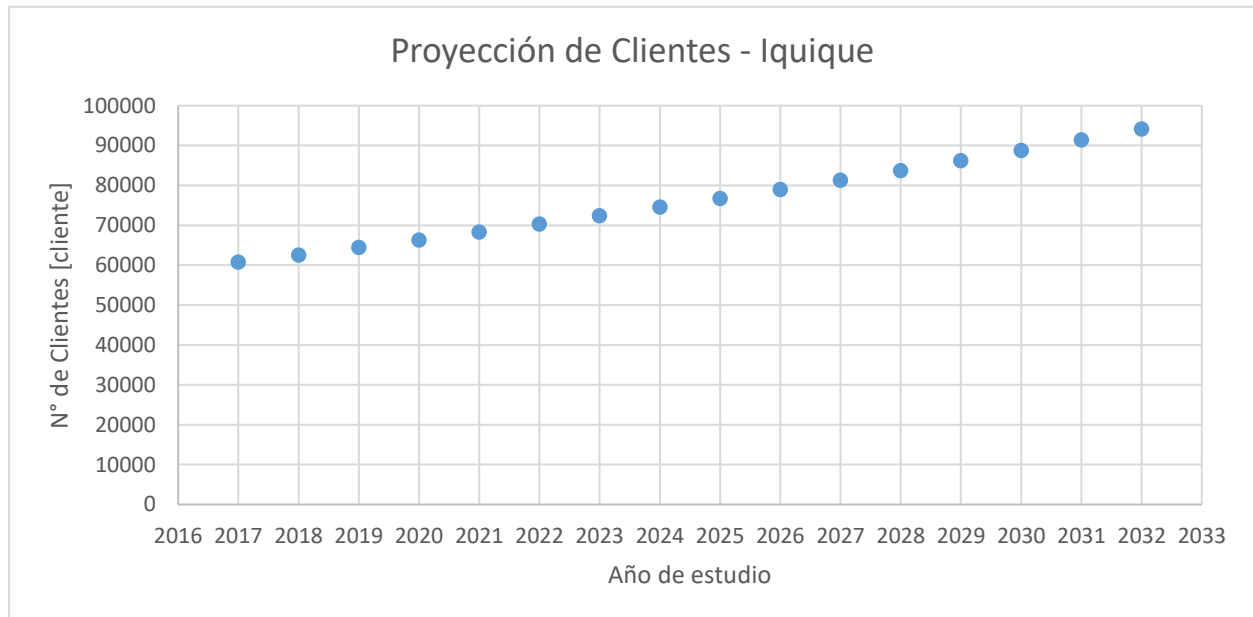


Gráfico 11.7: Proyección de clientes de Iquique, para los 15 años del horizonte de diseño, calculados según la ecuación (11.19).

$$Clientes_{año i} = Clientes_{año i-1} \times (1 + 0,0296) \quad (11.19)$$

información de los Clientes 52 BIS\*\* que corresponde a clientes No Regulados, por encontrarse fuera del territorio operacional de las empresas sanitarias.

\*\*Las Prestaciones No Reguladas son todos aquellos servicios en cuya ejecución la empresa de servicios sanitarios no tiene exclusividad, es decir, que pueden ser realizados por terceros o por la empresa sanitaria, donde el usuario decide quien los realiza. El Artículo 52º bis del DFL 382, correspondiente a la Ley General de Servicios Sanitarios, establece que “los prestadores podrán establecer, construir, mantener y explotar sistemas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas en el ámbito rural, bajo la condición de no afectar o comprometer la calidad y continuidad del servicio público sanitario”.

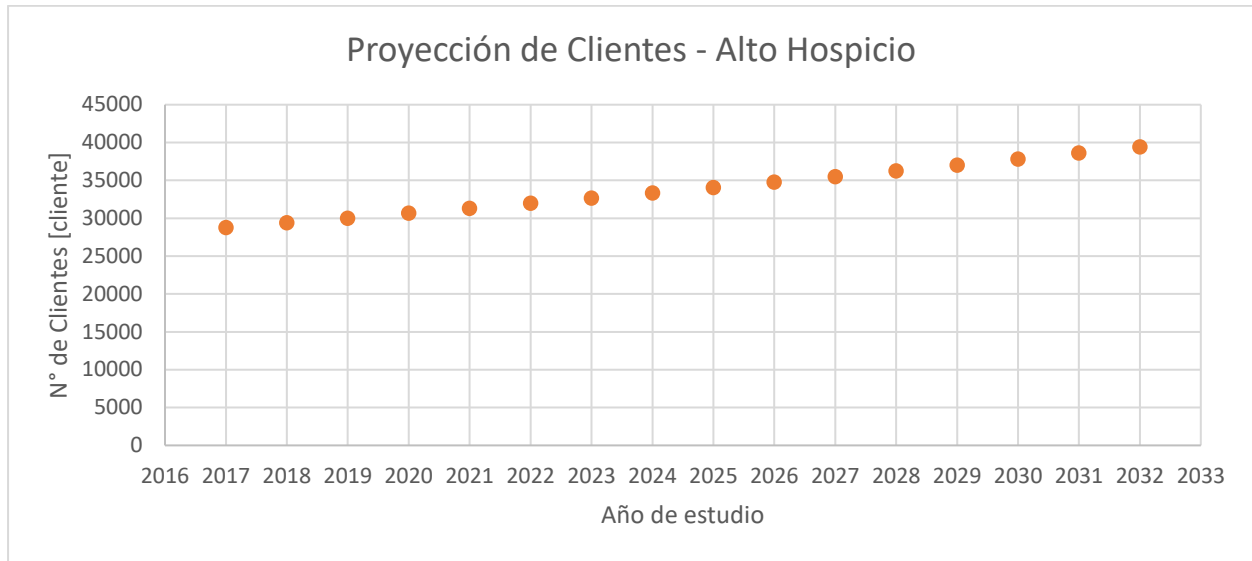


Gráfico 11.8: Proyección de clientes de Alto Hospicio, para 15 años del horizonte de diseño, calculados según la ecuación (11.20).

$$Clientes_{año\ i} = Clientes_{año\ i-1} \times (1 + 0,0212) \quad (11.20)$$

De esta forma, se obtienen todos los parámetros para poder determinar los caudales medios de consumo anual, de cada localidad, según la ecuación (11.17). A continuación, se presenta en la Tabla 11.13, los resultados obtenidos.

Tabla 11.13: Caudales medios de consumo, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referente a los 15 años de proyección.

Año	Año de estudio	Caudal Medio de Consumo	
		Iquique	Alto Hospicio
		[l/s]	[l/s]
0	2017	481,57	170,28
1	2018	489,49	174,00
2	2019	497,50	177,83
3	2020	505,55	181,74
4	2021	513,64	185,73
5	2022	521,77	189,81
6	2023	529,93	193,99
7	2024	538,11	198,25
8	2025	546,31	202,61
9	2026	554,53	207,06
10	2027	562,76	211,61
11	2028	570,99	216,26
12	2029	579,21	221,02
13	2030	587,41	225,87
14	2031	595,60	230,84
15	2032	603,76	235,91

Por concepto de diseño sanitario, a los caudales medios anuales, se les debe realizar una amplificación conservadora, para obtener así un estimado del Caudal Máximo Diario de consumo (Qmd), utilizando el Factor del Día de Máximo Consumo (FDMC), definido en la NCh691.Of2015

[82], como el producto entre dos coeficientes. Tanto el Qmd como el FDMC se presentan a continuación, en las ecuaciones (11.21) y (11.22), respectivamente.

$$Qmd_{año i} [l/s] = Qc_{medio año i} [l/s] \times FDMC \quad (11.21)$$

$$FDMC = CMMC \times CDMC \quad (11.22)$$

- CMMC = Coeficiente del Mes de Máximo Consumo, definido como el cociente entre el consumo máximo mensual y el consumo medio mensual.
- CDMC = Coeficiente del Día de máximo consumo en el mes de Máximo Consumo, definido como el cociente entre el consumo máximo diario y el consumo medio diario del mes de mayor consumo, cuyo valor mínimo establecido es de 1,1.

Para el caso del presente estudio, los valores del CMMC se obtienen con la información de facturaciones provenientes de la SIFAC II para el año 2017, particulares para cada localidad. Por otra parte, para el valor del CDMC se asume conservadoramente el mínimo de referencia, tal y como lo muestra la Tabla 11.14.

Tabla 11.14: Coeficientes y Factores de máximo consumo, determinados con la data de facturación proveniente de la SIFAC II, y donde el FDMC de cada localidad se calculó mediante la ecuación (11.22).

Coeficientes y Factores de Máximo Consumo		
	Iquique	Alto Hospicio
CMMC	1,08	1,04
CDMC	1,10	1,10
FDMC	1,18	1,15

Tabla 11.15: Caudales máximos diarios de consumo, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referente a los 15 años de proyección.

Año	Año de estudio	Caudal Máximo Diario de Consumo	
		Iquique	Alto Hospicio
		[l/s]	[l/s]
0	2017	570,36	195,73
1	2018	579,75	200,01
2	2019	589,23	204,41
3	2020	598,76	208,90
4	2021	608,35	213,49
5	2022	617,97	218,19
6	2023	627,63	222,98
7	2024	637,33	227,88
8	2025	647,04	232,89
9	2026	656,78	238,01
10	2027	666,52	243,24
11	2028	676,26	248,59
12	2029	686,00	254,05
13	2030	695,72	259,63
14	2031	705,42	265,34
15	2032	715,08	271,17

Tabla 11.16: Caudales máximos diarios de distribución, tanto para Iquique como Alto Hospicio, referente a los 15 años de proyección.

Año	Año de estudio	Caudal Máximo Diario de Distribución		Caudal Total de Diseño a Salir desde las PTAP
		Iquique	Alto Hospicio	Sistema IQQ-AH
		[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	873,38	299,72	1173,10
1	2018	887,75	306,27	1194,02
2	2019	902,27	313,00	1215,27
3	2020	916,87	319,88	1236,76
4	2021	931,54	326,92	1258,46
5	2022	946,28	334,10	1280,39
6	2023	961,08	341,45	1302,53
7	2024	975,92	348,95	1324,87
8	2025	990,80	356,62	1347,42
9	2026	1005,71	364,46	1370,17
10	2027	1020,62	372,47	1393,09
11	2028	1035,55	380,66	1416,20
12	2029	1050,46	389,02	1439,48
13	2030	1065,34	397,57	1462,91
14	2031	1080,19	406,31	1486,50
15	2032	1094,98	415,24	1510,22

#### 11.14 ANEXO N; “CAUDAL TOTAL DE DISEÑO”

Tabla 11.17: Aportes de la PTAP Santa Rosa, a los sistemas de Iquique y Alto Hospicio, especificando los caudales totales, a la salida y entrada de la planta, y también los caudales perdidos, tratados y no tratados.

Año	Aporte de PTAP Santa Rosa		PTAP Santa Rosa					
	Iquique	Alto Hospicio	Salida	Entrada	A Tratar	Pérdidas	Tratado	No Tratado
	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	299,72	299,72	599,45	626,05	532,15	26,61	505,54	93,91
1	306,27	306,27	612,54	639,73	543,77	27,19	516,58	95,96
2	313,00	313,00	626,01	653,79	555,73	27,79	527,94	98,07
3	319,88	319,88	639,77	668,17	567,94	28,40	539,54	100,22
4	326,92	326,92	653,83	682,85	580,43	29,02	551,40	102,43
5	334,10	334,10	668,21	697,86	593,18	29,66	563,53	104,68
6	341,45	341,45	682,89	713,20	606,22	30,31	575,91	106,98
7	348,95	348,95	697,90	728,88	619,55	30,98	588,57	109,33
8	356,62	356,62	713,24	744,90	633,17	31,66	601,51	111,74
9	364,46	364,46	728,92	761,27	647,08	32,35	614,73	114,19
10	372,47	372,47	744,94	778,01	661,30	33,07	628,24	116,70
11	380,66	380,66	761,31	795,10	675,84	33,79	642,05	119,27
12	389,02	389,02	778,04	812,58	690,69	34,53	656,16	121,89
13	397,57	397,57	795,14	830,44	705,87	35,29	670,58	124,57
14	406,31	406,31	812,62	848,69	721,38	36,07	685,32	127,30
15	415,24	415,24	830,48	867,34	737,24	36,86	700,38	130,10

Tabla 11.18: Aporte de caudal de cada una de las PTAP que abastecen al sistema de Iquique, y dicha demanda particular, como caudal máximo diario de distribución, para cada uno de los años del horizonte de diseño.

Año	Año de estudio	Aporte de PTAP		Iquique
		Santa Rosa	El Carmelo	Qdistribución
		[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	299,72	573,66	873,38
1	2018	306,27	581,48	887,75
2	2019	313,00	589,27	902,27
3	2020	319,88	596,99	916,87
4	2021	326,92	604,63	931,54
5	2022	334,10	612,18	946,28
6	2023	341,45	619,63	961,08
7	2024	348,95	626,97	975,92
8	2025	356,62	634,18	990,80
9	2026	364,46	641,25	1005,71
10	2027	372,47	648,15	1020,62
11	2028	380,66	654,89	1035,55
12	2029	389,02	661,43	1050,46
13	2030	397,57	667,77	1065,34
14	2031	406,31	673,88	1080,19
15	2032	415,24	679,74	1094,98

Tabla 11.19: Caudales a tratar por sector de Iquique, según un TD.

Año	Año de estudio	Iquique [l/s]	Caudal a Tratar por Sector				
			Qt-CV1	Qt-CV2	Qt-CV3	Qt-LD+H	Qt-C+SS
			[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	873,38	320,74	229,13	200,62	96,55	26,33
1	2018	887,75	326,02	232,90	203,92	98,14	26,77
2	2019	902,27	331,35	236,71	207,26	99,75	27,21
3	2020	916,87	336,71	240,54	210,61	101,36	27,65
4	2021	931,54	342,10	244,39	213,98	102,98	28,09
5	2022	946,28	347,51	248,26	217,37	104,61	28,53
6	2023	961,08	352,95	252,14	220,76	106,25	28,98
7	2024	975,92	358,40	256,04	224,17	107,89	29,43
8	2025	990,80	363,86	259,94	227,59	109,54	29,87
9	2026	1005,71	369,33	263,85	231,01	111,18	30,32
10	2027	1020,62	374,81	267,76	234,44	112,83	30,77
11	2028	1035,55	380,29	271,68	237,87	114,48	31,22
12	2029	1050,46	385,77	275,59	241,29	116,13	31,67
13	2030	1065,34	391,23	279,49	244,71	117,78	32,12
14	2031	1080,19	396,69	283,39	248,12	119,42	32,57
15	2032	1094,98	402,12	287,27	251,52	121,05	33,02

Tabla 11.20: Caudales a tratar por sector de Alto Hospicio, según un TD.

Año	Año de estudio	Alto Hospicio [l/s]	Caudal a Tratar por Sector		
			Qt-AH+EB	Qt-LT+ST+LN	Qt-LP
			[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	299,72	169,90	68,01	61,81
1	2018	306,27	173,61	69,50	63,16
2	2019	313,00	177,43	71,03	64,55
3	2020	319,88	181,33	72,59	65,96
4	2021	326,92	185,32	74,18	67,42
5	2022	334,10	189,39	75,81	68,90
6	2023	341,45	193,55	77,48	70,41
7	2024	348,95	197,81	79,18	71,96
8	2025	356,62	202,16	80,92	73,54
9	2026	364,46	206,60	82,70	75,16
10	2027	372,47	211,14	84,52	76,81
11	2028	380,66	215,78	86,38	78,50
12	2029	389,02	220,52	88,28	80,22
13	2030	397,57	225,37	90,22	81,99
14	2031	406,31	230,32	92,20	83,79
15	2032	415,24	235,38	94,23	85,63

### 11.15 ANEXO Ñ; “PORCENTAJES Y CAUDALES A TRATAR”

Tabla 11.21: Porcentajes de caudal a tratar, por PTAP y localidad, para eliminar la dureza y lograr la dureza objetivo en la mezcla, con el porcentaje de caudal no tratado.

Año	Año de estudio	Porcentajes de caudal a abatir dureza				
		Alto Hospicio	Iquique		Iquique	Sistema
		PTAP Santa Rosa	PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	Mezcla	IQQ-AH
		%	%	%	%	%
0	2017	71,62%	71,62%	69,26%	70,07%	70,47%
1	2018	71,62%	71,62%	69,26%	70,08%	70,47%
2	2019	71,62%	71,62%	69,26%	70,08%	70,48%
3	2020	71,62%	71,62%	69,26%	70,08%	70,48%
4	2021	71,62%	71,62%	69,26%	70,09%	70,49%
5	2022	71,62%	71,62%	69,26%	70,09%	70,49%
6	2023	71,62%	71,62%	69,26%	70,10%	70,50%
7	2024	71,62%	71,62%	69,26%	70,10%	70,50%
8	2025	71,62%	71,62%	69,26%	70,11%	70,51%
9	2026	71,62%	71,62%	69,26%	70,12%	70,52%
10	2027	71,62%	71,62%	69,26%	70,12%	70,52%
11	2028	71,62%	71,62%	69,26%	70,13%	70,53%
12	2029	71,62%	71,62%	69,26%	70,13%	70,54%
13	2030	71,62%	71,62%	69,26%	70,14%	70,54%
14	2031	71,62%	71,62%	69,26%	70,15%	70,55%
15	2032	71,62%	71,62%	69,26%	70,16%	70,56%

Tabla 11.22: Caudales a tratar, por PTAP y localidad, para eliminar la dureza y lograr la dureza objetivo en la mezcla, con el caudal no tratado.

Año	Año de estudio	Caudales a abatir dureza				
		Alto Hospicio	Iquique		Iquique	Sistema
		PTAP Santa Rosa (Qt-SR/2)	PTAP Santa Rosa (Qt-SR/2)	PTAP El Carmelo (Qt-EC)	Mezcla	IQQ-AH
		[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]
0	2017	214,67	214,67	397,32	611,98	826,65
1	2018	219,36	219,36	402,74	622,09	841,45
2	2019	224,18	224,18	408,13	632,31	856,49
3	2020	229,11	229,11	413,48	642,58	871,69
4	2021	234,14	234,14	418,77	652,91	887,06
5	2022	239,29	239,29	424,00	663,29	902,58
6	2023	244,55	244,55	429,16	673,71	918,26
7	2024	249,93	249,93	434,24	684,17	934,09
8	2025	255,42	255,42	439,24	694,65	950,07
9	2026	261,03	261,03	444,13	705,16	966,20
10	2027	266,77	266,77	448,91	715,68	982,45
11	2028	272,63	272,63	453,58	726,21	998,85
12	2029	278,62	278,62	458,11	736,74	1015,36
13	2030	284,75	284,75	462,50	747,25	1032,00
14	2031	291,01	291,01	466,73	757,74	1048,74
15	2032	297,40	297,40	470,79	768,19	1065,59

### 11.16 ANEXO O; “CAPEX; PRECIPITACIÓN CON CAL”

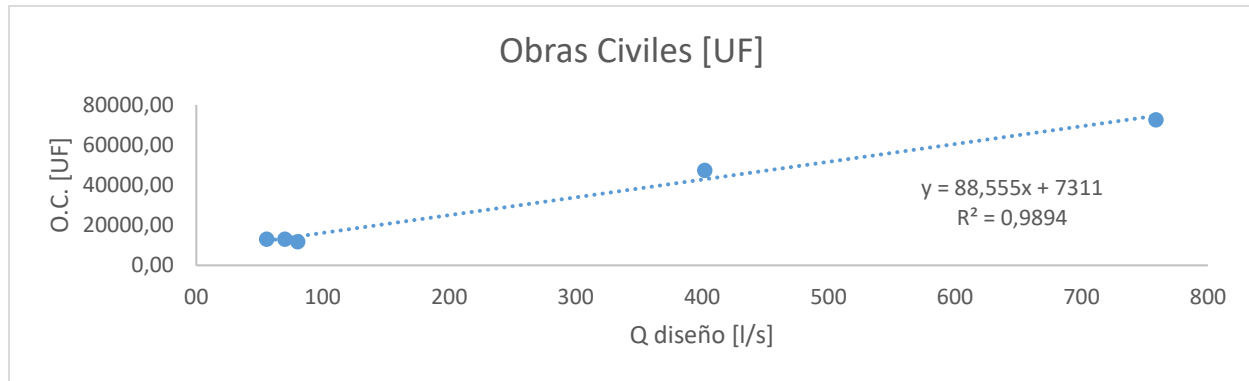


Gráfico 11.9: CAPEX de Obras Civiles de PT físico químico convencional en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.23).

$$CAPEX_{O.C.} = 88,555 * Q_{diseño} + 7311 \quad (11.23)$$

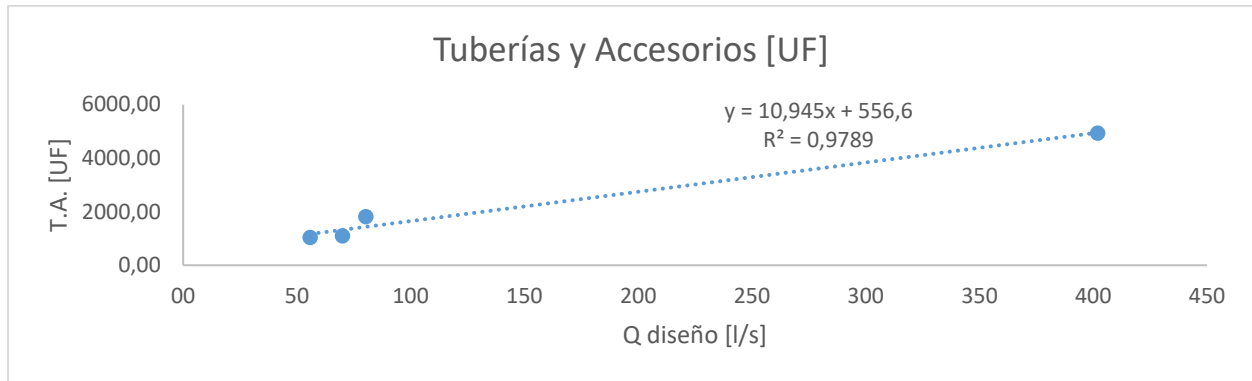


Gráfico 11.10: CAPEX de Tuberías y Accesorios de PT físico químico convencional en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.24).

$$CAPEX_{T.A.} = 10,945 * Q_{diseño} + 556,6 \quad (11.24)$$

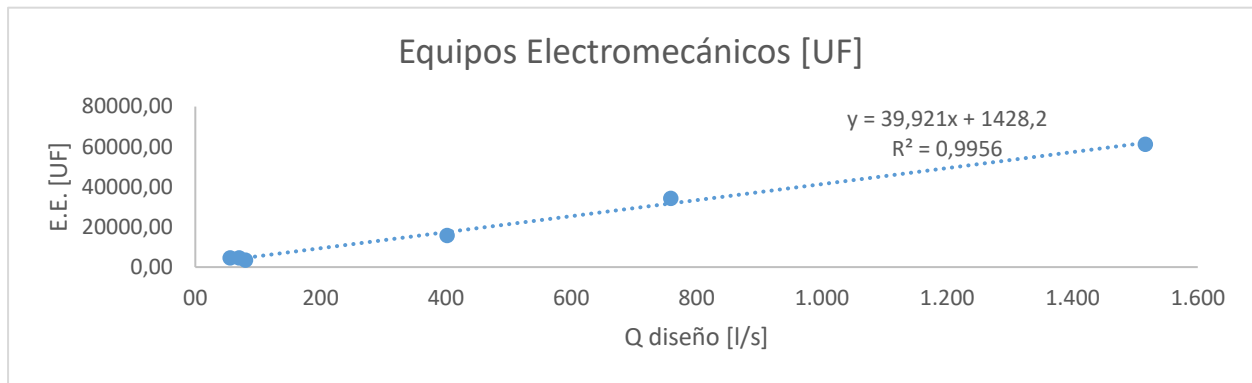


Gráfico 11.11: CAPEX de Equipos Electromecánicos de PT físico químico convencional en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.25).

$$CAPEX_{E.E.} = 39,921 * Q_{diseño} + 1428,2 \quad (11.25)$$

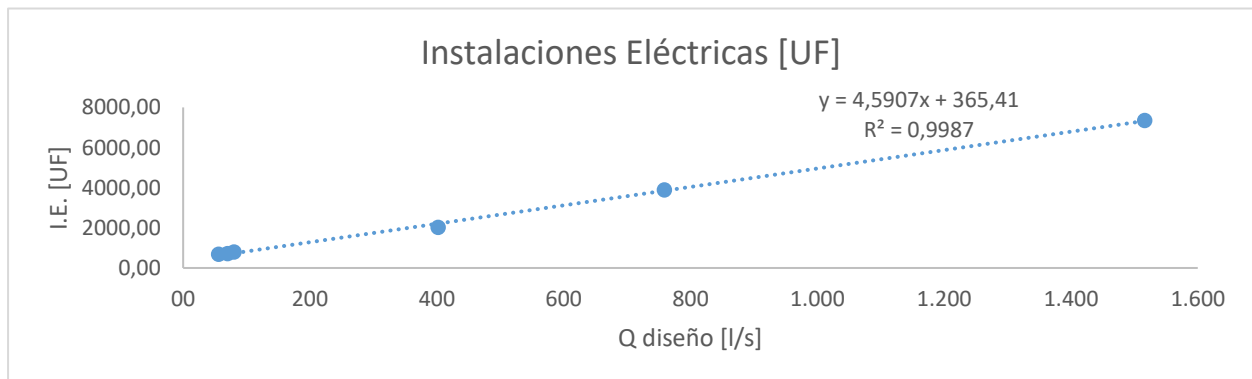


Gráfico 11.12: CAPEX de Instalaciones Eléctricas de PT físico químico convencional en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.26).

$$CAPEX_{I.E.} = 4,591 * Q_{diseño} + 365,41 \quad (11.26)$$

Tabla 11.23: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Precipitación con Cal, según el TC.

Punto a Tratar (PTAP)	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	Sub-Total +20% [UF]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.		
Santa Rosa	594,80	59.983,70	7.066,71	25.173,29	3.095,97	95.319,67	114.383,60
El Carmelo	470,79	49.001,95	5.709,41	20.222,67	2.526,67	77.460,71	92.952,85
<b>Total CAPEX [UF]</b>						<b>207.336,45</b>	

Tabla 11.24: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Precipitación con Cal, según el TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	Sub-Total +20% [UF]	
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.			
AH	AH+EB	165,97	22.008,30	2.373,12	8.053,81	1.127,32	33.562,55	40.275,06
	LT+ST+LN	66,44	13.194,42	1.283,76	4.080,47	670,41	19.229,06	23.074,87
	LP	60,38	12.657,60	1.217,42	3.838,47	642,58	18.356,06	22.027,28
IQQ	CV1	283,53	32.419,17	3.659,86	12.747,08	1.667,02	50.493,12	60.591,74
	CV2	202,55	25.248,07	2.773,54	9.514,31	1.295,27	38.831,20	46.597,44
	CV3	177,35	23.015,90	2.497,66	8.508,04	1.179,55	35.201,16	42.241,39
	LD+H	85,35	14.869,48	1.490,79	4.835,60	757,24	21.953,12	26.343,74
	C+SS	23,28	9.372,52	811,39	2.357,54	472,28	13.013,73	15.616,48
<b>Total CAPEX [UF]</b>						<b>276.768,00</b>		

### 11.17 ANEXO P; “COSTOS DIRECTOS DE OPERACIÓN Y MANTENCIÓN”

Los costos directos de operación y mantenimiento, presentados en los estudios tarifarios de las empresas sanitarias, contemplan los siguientes ítems:

- 1) Productos Químicos
- 2) Energía Eléctrica
- 3) Materiales y repuestos
- 4) Servicios de Laboratorio
- 5) Transporte y disposición de lodos
- 6) Control y monitoreo ambiental
- 7) Concesiones marítimas
- 8) Servicios de Operación y Mantenimiento

Luego de realizar un catastro de la información referente a los costos directos de operación y mantenimiento, de todos los procesos sanitarios (Producción, Distribución, Recolección y

Disposición), se llega a que, en promedio, los costos asociados a la etapa de producción representan el 70% del costo total de todo el proceso.

Además, según la información de los estudios tarifarios de las sanitarias Aguas del Altiplano, Aguas Antofagasta, Aguas Chañar, Aguas del Valle y ESVAL, cada uno de los ítems mencionados poseen, en promedio, los porcentajes presentados en la *Tabla 11.25*.

Tabla 11.25: Peso porcentual de cada componente de los Costos Directos de operación y mantención, de las empresas sanitarias en estudio.

		Promedio
		%
Costos Directos de operación y mantención	Productos químicos	8,87%
	Energía eléctrica	51,69%
	Materiales y repuestos	4,67%
	Servicios de Laboratorio	4,57%
	Transporte y disposición de lodos	3,17%
	Control y Monitoreo ambiental	0,87%
	Concesiones marítimas	0,09%
	Servicios de Operación y Mantención	26,06%
<b>TOTAL [%]</b>		<b>100,00%</b>

## 11.18 ANEXO Q; “OPEX; PRECIPITACIÓN CON CAL”

### 11.18.1 OPEX PT físico químico Convencional OPEX C.:

Se consideran solo los costos operacionales de las empresas sanitarias de la III, IV y V Región del país, sin considerar los de la I y II Región, al contar con muchas plantas de osmosis inversa, lo que aumenta considerablemente el costo operacional. Por otra parte, las sanitarias del centro y sur poseen realidades geográficas muy diferentes como para considerar su información de costos operacionales.

De esta forma, y con la información disponible de OPEX de las empresas sanitarias Aguas Chañar (III Región), Aguas del Valle (IV Región), y ESVAL (V Región), todas con tratamiento físico químico convencional, se obtiene una relación de costos en función de la facturación anual de AP (Equivalente a cada PT), en miles de metros cúbicos ([Mm<sup>3</sup>]). A continuación, a dichos costos se les calcula el 70%, dado que se estima que dicho porcentaje del OPEX anual, corresponde a la etapa de producción<sup>106</sup>, pertinente al presente estudio, y a este, se le calcula el 33% referente al costo por PTAP<sup>107</sup> (quedando una estimación conservadora de los costos operacionales por PTAP, según la facturación anual). Así, se obtienen el grafico *Gráfico 11.13*, y su respectiva ecuación (11.27).

<sup>106</sup> Según los Costos directos de Operación y Mantención de cada etapa de las empresas sanitarias (Producción, Distribución, Recolección y Disposición), presentadas en el Estudio Tarifario de ADA, en su anexo 7.

<sup>107</sup> Sabiendo que los costos se refieren a la operación de toda la etapa de producción, su principal componente son las PTAP. Así, se asume que las empresas en estudio cuentan con al menos 3 PTAP, o sistemas que requieren de altos costos operacionales.

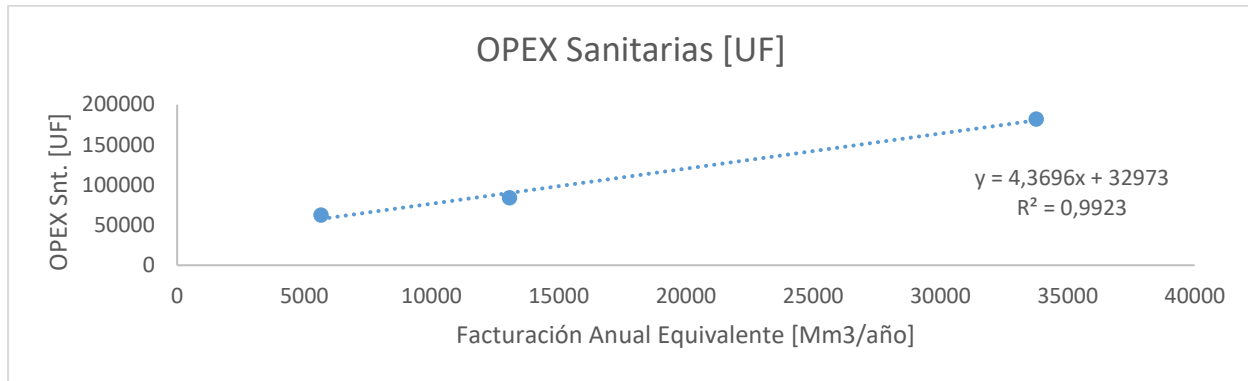


Gráfico 11.13: Estimación de OPEX por PTAP, en función de la facturación anual, según empresas sanitarias, referentes a la etapa de producción, que poseen PTAP convencionales. Empresas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.27).

$$OPEX_{sanitarias} = 4,370 * Facturación_{anual} + 32973 \quad (11.27)$$

Así, dado que se conocen los caudales medios de consumo, presentados en la Tabla 11.13, se estiman las facturaciones anuales medias, para cada localidad según la ecuación (11.28), mostrando los resultados resumidos en la Tabla 11.26 (información completa en la Tabla 11.31), y que se utilizarán para estimar los OPEX según un TD.

$$Facturación_{media \text{ año } i} \left[ \frac{Mm^3}{año} \right] = \frac{Q_{c \text{ medio año } i} \left[ \frac{\text{litro}}{\text{segundo}} \right] \times 3600 \left[ \frac{\text{segundo}}{\text{hora}} \right] \times 24 \left[ \frac{\text{hora}}{\text{día}} \right] \times 365 \left[ \frac{\text{día}}{\text{año}} \right]^{108}}{1000 \left[ \frac{\text{litro}}{m^3} \right] \times 1000 \left[ \frac{m^3}{Mm^3} \right]} \quad (11.28)$$

Tabla 11.26: Resumen de facturación anual media de AP, para cada localidad en estudio y el total del sistema IQQ-AH, en los 15 años del horizonte de diseño.

Año	Año de estudio	Facturación Anual Media		
		Alto Hospicio [Mm³]	Iquique [Mm³]	Total [Mm³]
0	2017	5.370,03	15.186,77	20.556,80
1	2018	5.487,35	15.436,70	20.924,05
5	2022	5.985,99	16.454,48	22.440,47
10	2027	6.673,41	17.747,15	24.420,56
15	2032	7.460,05	19.092,23	26.552,28

Por otra parte, según las proyecciones realizadas, los porcentajes de caudal abastecidos por las PTAP, Santa Rosa y El Carmelo, a la totalidad del Sistema IQQ-AH, tienen una pequeña variación anual, presentada en la Tabla 11.27.

<sup>108</sup> Se consideran 366 años, para los años bisiestos 2020, 2024, 2028 y 2032, del horizonte de diseño.

Tabla 11.27: Porcentajes de aporte de caudal a la totalidad del sistema IQQ-AH, desde cada una de las PTAP.

Año	Año de estudio	Porcentajes de aporte por PTAP	
		Santa Rosa	El Carmelo
		%	%
0	2017	51,10%	48,90%
1	2018	51,30%	48,70%
2	2019	51,51%	48,49%
3	2020	51,73%	48,27%
4	2021	51,95%	48,05%
5	2022	52,19%	47,81%
6	2023	52,43%	47,57%
7	2024	52,68%	47,32%
8	2025	52,93%	47,07%
9	2026	53,20%	46,80%
10	2027	53,47%	46,53%
11	2028	53,76%	46,24%
12	2029	54,05%	45,95%
13	2030	54,35%	45,65%
14	2031	54,67%	45,33%
15	2032	54,99%	45,01%

Así, aplicando dichos porcentajes al total de la facturación anual media de la Tabla 11.26, se obtienen las facturaciones correspondientes a cada PTAP aplicado centralizadamente, mostradas resumidamente por la Tabla 11.28 (información completa en la Tabla 11.32).

Tabla 11.28: Resumen de facturación de AP estimada, referente al aporte de cada PTAP al sistema IQQ-AH.

Año	Año de estudio	Facturación por PTAP	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]
0	2017	10.504,37	10.052,43
1	2018	10.734,18	10.189,87
5	2022	11.711,18	10.729,29
10	2027	13.058,60	11.361,96
15	2032	14.601,23	11.951,05

De esta forma, aplicando la ecuación (11.27) y restando un 12%<sup>109</sup>, para ambas alternativas de aplicación “1” y “2”, se obtienen los resúmenes de los OPEX mostrados por la Tabla 11.29 y la Tabla 11.30 respectivamente (información completa en la Tabla 11.33 y la Tabla 11.34).

<sup>109</sup> Dado que más adelante se detallan de forma separada los costos de agregados de productos químicos y transporte y disposición de lodos, se resta un 12%, equivalente al porcentaje que representan dichos ítems de la totalidad de los costos de operación y mantención, presentados en el ANEXO P; “Costos Directos de Operación y Mantención”.

Tabla 11.29: Resumen de OPEX anual, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC.

Año	OPEX C.		Total OPEX C. IQQ-AH
	PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	
	[UF]	[UF]	[UF]
2017	69.408,17	67.670,31	137.078,48
2018	70.291,81	68.198,83	138.490,64
2022	74.048,64	70.273,02	144.321,66
2027	79.229,79	72.705,81	151.935,60
2032	85.161,59	74.971,00	160.132,60

Tabla 11.30: Resumen de OPEX anual, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD.

Año	Sectores Alto Hospicio	Sectores Iquique	Total OPEX C. IQQ-AH
	[UF]	[UF]	
2017	107.697,83	203.478,09	311.175,92
2018	108.148,93	204.439,15	312.588,08
2022	110.066,35	208.352,74	318.419,10
2027	112.709,65	213.323,39	326.033,04
2032	115.734,46	218.495,58	334.230,04

Cabe mencionar que para el Tratamiento Disperso, se utilizaron los porcentajes de cada sector, obteniendo los OPEX C. de cada una de las plantas de cada sector presentados en detalle en la Tabla 11.35 y

Tabla 11.36), tanto para Iquique como para Alto Hospicio, y cuya suma se muestra resumida en la Tabla 11.30.

#### 11.18.1.1 Tablas Completas:

Tabla 11.31: Facturación anual media de AP, para cada localidad en estudio y el total del sistema IQQ-AH, en los 15 años del horizonte de diseño.

Año	Año de estudio	Facturación Anual Media		
		Alto Hospicio	Iquique	Total
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]
0	2017	5.370,03	15.186,77	20.556,80
1	2018	5.487,35	15.436,70	20.924,05
2	2019	5.607,98	15.689,16	21.297,13
3	2020	5.746,96	15.986,71	21.733,67
4	2021	5.857,24	16.198,18	22.055,43
5	2022	5.985,99	16.454,48	22.440,47
6	2023	6.117,57	16.711,75	22.829,32
7	2024	6.269,17	17.016,33	23.285,50
8	2025	6.389,46	17.228,56	23.618,02
9	2026	6.529,90	17.487,73	24.017,63
10	2027	6.673,41	17.747,15	24.420,56
11	2028	6.838,77	18.055,94	24.894,70
12	2029	6.969,97	18.265,87	25.235,84
13	2030	7.123,15	18.524,71	25.647,86
14	2031	7.279,69	18.782,86	26.062,55
15	2032	7.460,05	19.092,23	26.552,28

Tabla 11.32: Facturación de AP estimada, referente al aporte de cada PTAP al sistema IQQ-AH.

Año	Año de estudio	Facturación por PTAP	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]
0	2017	10.504,37	10.052,43
1	2018	10.734,18	10.189,87
2	2019	10.970,50	10.326,63
3	2020	11.242,75	10.490,92
4	2021	11.458,89	10.596,54
5	2022	11.711,18	10.729,29
6	2023	11.969,04	10.860,28
7	2024	12.266,10	11.019,40
8	2025	12.501,94	11.116,08
9	2026	12.777,23	11.240,39
10	2027	13.058,60	11.361,96
11	2028	13.382,74	11.511,97
12	2029	13.640,09	11.595,75
13	2030	13.940,49	11.707,36
14	2031	14.247,53	11.815,02
15	2032	14.601,23	11.951,05

Tabla 11.33: OPEX anual, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC.

Año	OPEX C.		Total OPEX C. IQQ-AH
	PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	
	[UF]	[UF]	[UF]
2017	69.408,17	67.670,31	137.078,48
2018	70.291,81	68.198,83	138.490,64
2019	71.200,53	68.724,70	139.925,24
2020	72.247,40	69.356,42	141.603,82
2021	73.078,50	69.762,57	142.841,07
2022	74.048,64	70.273,02	144.321,66
2023	75.040,17	70.776,72	145.816,89
2024	76.182,43	71.388,57	147.570,99
2025	77.089,29	71.760,32	148.849,62
2026	78.147,87	72.238,33	150.386,20
2027	79.229,79	72.705,81	151.935,60
2028	80.476,19	73.282,61	153.758,79
2029	81.465,77	73.604,77	155.070,54
2030	82.620,90	74.033,95	156.654,84
2031	83.801,51	74.447,94	158.249,46
2032	85.161,59	74.971,00	160.132,60

Tabla 11.34: OPEX anual, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD.

Año	Sectores Alto Hospicio	Sectores Iquique	Total OPEX C. IQQ-AH
	[UF]	[UF]	[UF]
2017	107.697,83	203.478,09	311.175,92
2018	108.148,93	204.439,15	312.588,08
2019	108.612,78	205.409,89	314.022,68
2020	109.147,20	206.554,06	315.701,26
2021	109.571,27	207.367,24	316.938,51
2022	110.066,35	208.352,74	318.419,10
2023	110.572,31	209.342,02	319.914,33
2024	111.155,23	210.513,20	321.668,43
2025	111.617,78	211.329,28	322.947,06
2026	112.157,79	212.325,86	324.483,64
2027	112.709,65	213.323,39	326.033,04
2028	113.345,48	214.510,76	327.856,23
2029	113.849,99	215.318,00	329.167,98
2030	114.439,00	216.313,29	330.752,28
2031	115.040,93	217.305,96	332.346,90
2032	115.734,46	218.495,58	334.230,04

Tabla 11.35: Detalle de los OPEX del tipo OPEX C., para la aplicación de la Precipitación con Cal, según los puntos de aplicación del TD, para la localidad de Alto Hospicio.

Año	Sector			Alto Hospicio
	AH+EB	LT+ST+LN	LP	
	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
2017	40.721,51	33.701,93	33.274,39	107.697,83
2018	40.977,22	33.804,29	33.367,42	108.148,93
2019	41.240,16	33.909,55	33.463,07	108.612,78
2020	41.543,11	34.030,82	33.573,28	109.147,20
2021	41.783,50	34.127,05	33.660,73	109.571,27
2022	42.064,14	34.239,39	33.762,82	110.066,35
2023	42.350,95	34.354,20	33.867,15	110.572,31
2024	42.681,39	34.486,48	33.987,36	111.155,23
2025	42.943,59	34.591,44	34.082,75	111.617,78
2026	43.249,70	34.713,98	34.194,10	112.157,79
2027	43.562,54	34.839,21	34.307,91	112.709,65
2028	43.922,96	34.983,49	34.439,02	113.345,48
2029	44.208,95	35.097,97	34.543,06	113.849,99
2030	44.542,84	35.231,63	34.664,52	114.439,00
2031	44.884,06	35.368,22	34.788,65	115.040,93
2032	45.277,20	35.525,60	34.931,67	115.734,46

Tabla 11.36: Detalle de los OPEX del tipo OPEX C, para la aplicación de la Precipitación con Cal, según los puntos de aplicación del TD, para la localidad de Iquique.

Año	Sector					Iquique
	CV1	CV2	CV3	LD+H	C+SS	
	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
2017	50.461,84	44.336,81	42.430,25	35.472,16	30.777,04	203.478,09
2018	50.814,78	44.588,94	42.651,01	35.578,40	30.806,02	204.439,15
2019	51.171,27	44.843,62	42.873,99	35.685,72	30.835,29	205.409,89
2020	51.591,45	45.143,79	43.136,81	35.812,21	30.869,79	206.554,06
2021	51.890,09	45.357,13	43.323,60	35.902,11	30.894,31	207.367,24
2022	52.252,00	45.615,68	43.549,97	36.011,06	30.924,02	208.352,74
2023	52.615,30	45.875,22	43.777,22	36.120,43	30.953,85	209.342,02
2024	53.045,41	46.182,48	44.046,24	36.249,90	30.989,17	210.513,20
2025	53.345,10	46.396,58	44.233,70	36.340,12	31.013,77	211.329,28
2026	53.711,08	46.658,04	44.462,62	36.450,30	31.043,82	212.325,86
2027	54.077,42	46.919,74	44.691,75	36.560,58	31.073,90	213.323,39
2028	54.513,46	47.231,25	44.964,50	36.691,84	31.109,70	214.510,76
2029	54.809,91	47.443,03	45.149,92	36.781,09	31.134,04	215.318,00
2030	55.175,42	47.704,15	45.378,54	36.891,12	31.164,05	216.313,29
2031	55.539,97	47.964,58	45.606,57	37.000,86	31.193,98	217.305,96
2032	55.976,84	48.276,68	45.879,83	37.132,38	31.229,85	218.495,58

### 11.18.2 OPEX por Agregados Químicos para la precipitación con cal OPEX Q.:

Para esta estimación, se utiliza la hipótesis de cálculo de Omar Pérez F. en su memoria de título [70], la que aplicada en las concentraciones de dureza del estudio queda como lo muestra la Tabla 11.37, dadas las condiciones de tratamiento de la Tabla 11.38.

Tabla 11.37: Concentraciones de compuestos en el agua, en su condición antes y después de tratar, para los compuestos a remover en el tratamiento de precipitación con cal.

Concentración en el agua				
Condición	Dureza			CO <sub>2</sub>
	Total	Carbonatada	No Carbonatada	
	[mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]			[mg/l]
Sin Tratar	501,8	433,2	68,6	25,0
Tratada	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 11.38: Concentraciones de los compuestos a remover por precipitación con cal, y sus correspondientes concentraciones de agregados químicos necesarios para lograrlo.

Compuesto a remover	Unidad	Valor	Agregado químico necesario	Unidad	Valor
Dureza Carbonatada	[mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	433,2	Cal (Ca(OH) <sub>2</sub> ; Hidróxido de Calcio)	[mg/l]	457,1
Dureza No Carbonatada	[mg/l de CaCO <sub>3</sub> ]	68,6	Soda (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ); Carbonato de Sodio)	[mg/l]	86,0
CO <sub>2</sub>	[mg/l]	25,0	CO <sub>2</sub>	[mg/l]	22,0

Así, y con los costos de los Agregados Químicos (A.Q.) utilizados por el estudio [70], y pasados a UF como muestra la Tabla 11.39, se determinan las dosis anuales de (A.Q.) necesarios

para cada alternativa en toneladas ([Ton]), presentadas en la Tabla 11.42 y la Tabla 11.43), pudiendo determinar finalmente los OPEX Q. respectivos, mostrados de forma sintetizada en la Tabla 11.40 y la Tabla 11.41, de forma centralizada y dispersa, respectivamente (información completa en la Tabla 11.44 y la Tabla 11.45).

Tabla 11.39: Costos de los agregados químicos de la precipitación con cal al 2018, y su respectiva equivalencia en UF, dado un valor de la UF al 31.12.2018 de \$27.565,79 [CLP].

Agregado Químico	Costo 2018 [CLP/kg]	Costo [UF/kg]
Cal (Ca(OH) <sub>2</sub> ; Hidróxido de Calcio)	\$ 155,0	0,005583
Soda (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ); Carbonato de Sodio)	\$ 1.019,0	0,036971
CO <sub>2</sub>	\$ 20,5	0,000745

Tabla 11.40: Resumen de los OPEX anuales de A.Q., de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC.

Año	OPEX Q.		Total OPEX Q. IQQ-AH
	PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	
	[UF]	[UF]	[UF]
2017	77.842,82	72.037,53	149.880,35
2018	79.543,35	73.020,28	152.563,63
2022	86.771,65	76.875,44	163.647,09
2027	96.736,32	81.392,78	178.129,11
2032	108.139,22	85.593,25	193.732,46

Tabla 11.41: Resumen de los OPEX anuales de A.Q., de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD.

Año	Sectores Alto Hospicio	Sectores Iquique	Total OPEX Q. IQQ-AH
	[UF]	[UF]	
2017	38.316,92	111.653,61	149.970,52
2018	39.153,98	113.491,14	152.645,12
2022	42.712,00	120.973,84	163.685,84
2027	47.616,95	130.477,61	178.094,57
2032	53.229,85	140.366,72	193.596,58

Cabe mencionar que, para el TD, se utilizaron los porcentajes de cada sector, presentados por la Tabla 6.2, obteniendo los OPEX Q. de cada una de las plantas de cada sector presentados en detalle en la Tabla 11.46 y la Tabla 11.47, tanto para Iquique como para Alto Hospicio, y cuya suma se muestra en la Tabla 11.41.

### 11.18.2.1 Tablas Completas:

Tabla 11.42: Dosis de agregados químicos anuales requeridos, para el tratamiento por precipitación con cal, según la “Aplicación 1”.

Año	Año de estudio	Santa Rosa (85%, % Tratado)			El Carmelo (% Tratado)		
		CO2	Cal	Soda	CO2	Cal	Soda
		[Ton]	[Ton]	[Ton]	[Ton]	[Ton]	[Ton]
0	2017	297,87	6.189,36	1.164,79	275,65	5.727,78	1.077,92
1	2018	304,38	6.324,57	1.190,23	279,42	5.805,92	1.092,63
2	2019	311,07	6.463,61	1.216,40	283,16	5.883,65	1.107,26
3	2020	318,78	6.623,80	1.246,54	287,65	5.977,06	1.124,83
4	2021	324,89	6.750,91	1.270,47	290,54	6.037,03	1.136,12
5	2022	332,04	6.899,30	1.298,39	294,17	6.112,45	1.150,31
6	2023	339,33	7.050,96	1.326,93	297,75	6.186,85	1.164,31
7	2024	347,74	7.225,68	1.359,82	302,10	6.277,26	1.181,33
8	2025	354,42	7.364,33	1.385,91	304,74	6.332,09	1.191,65
9	2026	362,21	7.526,19	1.416,37	308,13	6.402,64	1.204,93
10	2027	370,17	7.691,61	1.447,50	311,45	6.471,63	1.217,91
11	2028	379,34	7.882,19	1.483,36	315,55	6.556,79	1.233,93
12	2029	386,62	8.033,41	1.511,82	317,83	6.604,21	1.242,86
13	2030	395,11	8.209,96	1.545,05	320,88	6.667,48	1.254,76
14	2031	403,80	8.390,38	1.579,00	323,81	6.728,47	1.266,24
15	2032	413,80	8.598,26	1.618,12	327,53	6.805,61	1.280,76

Tabla 11.43: Dosis de agregados químicos anuales requeridos, para el tratamiento por precipitación con cal, según la “Aplicación 2”, tratando los porcentajes de caudal respectivos para cada uno de los puntos de aplicación.

Año	Año de estudio	Alto Hospicio (% Tratado)			Iquique (% Tratado)		
		CO2	Cal	Soda	CO2	Cal	Soda
		[Ton]	[Ton]	[Ton]	[Ton]	[Ton]	[Ton]
0	2017	146,62	3.046,62	573,35	427,25	8.877,69	1.670,71
1	2018	149,82	3.113,17	585,87	434,28	9.023,80	1.698,21
2	2019	153,12	3.181,61	598,75	441,38	9.171,37	1.725,98
3	2020	156,91	3.260,46	613,59	449,75	9.345,31	1.758,71
4	2021	159,92	3.323,03	625,37	455,70	9.468,94	1.781,98
5	2022	163,44	3.396,08	639,11	462,91	9.618,76	1.810,17
6	2023	167,03	3.470,72	653,16	470,15	9.769,15	1.838,47
7	2024	171,17	3.556,73	669,35	478,72	9.947,20	1.871,98
8	2025	174,56	3.624,98	682,19	484,69	10.071,26	1.895,33
9	2026	178,29	3.704,65	697,19	491,98	10.222,76	1.923,84
10	2027	182,21	3.786,07	712,51	499,28	10.374,41	1.952,38
11	2028	186,72	3.879,89	730,16	507,97	10.554,92	1.986,35
12	2029	190,31	3.954,32	744,17	513,87	10.677,64	2.009,44
13	2030	194,49	4.041,23	760,53	521,15	10.828,95	2.037,92
14	2031	198,76	4.130,04	777,24	528,42	10.979,86	2.066,32
15	2032	203,69	4.232,36	796,50	537,12	11.160,70	2.100,35

Tabla 11.44: OPEX anuales de agregados químicos, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC.

Año	OPEX Q.		Total OPEX Q. IQQ-AH
	PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	
	[UF]	[UF]	
2017	77.842,82	72.037,53	149.880,35
2018	79.543,35	73.020,28	152.563,63
2019	81.291,99	73.997,94	155.289,94
2020	83.306,64	75.172,69	158.479,33
2021	84.905,29	75.926,96	160.832,25
2022	86.771,65	76.875,44	163.647,09
2023	88.678,98	77.811,18	166.490,17
2024	90.876,48	78.948,27	169.824,75
2025	92.620,19	79.637,85	172.258,03
2026	94.655,91	80.525,22	175.181,13
2027	96.736,32	81.392,78	178.129,11
2028	99.133,26	82.463,83	181.597,09
2029	101.035,15	83.060,32	184.095,47
2030	103.255,59	83.855,97	187.111,57
2031	105.524,77	84.623,14	190.147,91
2032	108.139,22	85.593,25	193.732,46

Tabla 11.45: OPEX anuales de agregados químicos, de la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD.

Año	Sectores Alto Hospicio	Sectores Iquique	Total OPEX Q. IQQ-AH
	[UF]	[UF]	[UF]
2017	38.316,92	111.653,61	149.970,52
2018	39.153,98	113.491,14	152.645,12
2019	40.014,72	115.347,18	155.361,90
2020	41.006,40	117.534,79	158.541,19
2021	41.793,31	119.089,57	160.882,88
2022	42.712,00	120.973,84	163.685,84
2023	43.650,85	122.865,32	166.516,17
2024	44.732,54	125.104,59	169.837,13
2025	45.590,93	126.664,92	172.255,85
2026	46.592,90	128.570,35	175.163,26
2027	47.616,95	130.477,61	178.094,57
2028	48.796,81	132.747,83	181.544,64
2029	49.732,99	134.291,25	184.024,24
2030	50.825,96	136.194,23	187.020,20
2031	51.942,93	138.092,20	190.035,14
2032	53.229,85	140.366,72	193.596,58

Tabla 11.46: Detalle de los OPEX del tipo OPEX Q. para la aplicación de la Precipitación con Cal, en un TD, para la localidad de Alto Hospicio.

Año	Sector			Alto Hospicio
	AH+EB	LT+ST+LN	LP	
	[UF]	[UF]	[UF]	
2017	21.720,54	8.694,86	7.901,52	38.316,92
2018	22.195,04	8.884,81	8.074,13	39.153,98
2019	22.682,97	9.080,12	8.251,63	40.014,72
2020	23.245,11	9.305,16	8.456,13	41.006,40
2021	23.691,19	9.483,72	8.618,40	41.793,31
2022	24.211,96	9.692,19	8.807,85	42.712,00
2023	24.744,16	9.905,23	9.001,46	43.650,85
2024	25.357,33	10.150,69	9.224,52	44.732,54
2025	25.843,88	10.345,54	9.401,51	45.590,93
2026	26.411,91	10.572,84	9.608,15	46.592,90
2027	26.992,41	10.805,22	9.819,32	47.616,95
2028	27.661,23	11.072,95	10.062,63	48.796,81
2029	28.191,91	11.285,39	10.255,68	49.732,99
2030	28.811,49	11.533,41	10.481,07	50.825,96
2031	29.444,66	11.786,87	10.711,41	51.942,93
2032	30.174,17	12.078,90	10.976,79	53.229,85

Tabla 11.47: Detalle de los OPEX del tipo OPEX Q., para la aplicación de la Precipitación con Cal, en un TD, para la localidad de Iquique.

Año	Sector					Iquique
	CV1	CV2	CV3	LD+H	C+SS	
	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	
2017	41.003,53	29.292,59	25.647,29	12.343,57	3.366,61	111.653,61
2018	41.678,34	29.774,68	26.069,38	12.546,72	3.422,02	113.491,14
2019	42.359,95	30.261,61	26.495,72	12.751,91	3.477,98	115.347,18
2020	43.163,33	30.835,54	26.998,23	12.993,75	3.543,95	117.534,79
2021	43.734,30	31.243,44	27.355,37	13.165,64	3.590,83	119.089,57
2022	44.426,28	31.737,78	27.788,19	13.373,95	3.647,64	120.973,84
2023	45.120,90	32.234,01	28.222,67	13.583,06	3.704,67	122.865,32
2024	45.943,25	32.821,49	28.737,04	13.830,61	3.772,19	125.104,59
2025	46.516,27	33.230,85	29.095,45	14.003,11	3.819,24	126.664,92
2026	47.216,01	33.730,74	29.533,14	14.213,76	3.876,69	128.570,35
2027	47.916,43	34.231,12	29.971,25	14.424,61	3.934,20	130.477,61
2028	48.750,15	34.826,71	30.492,72	14.675,59	4.002,65	132.747,83
2029	49.316,95	35.231,64	30.847,26	14.846,22	4.049,19	134.291,25
2030	50.015,80	35.730,89	31.284,38	15.056,60	4.106,57	136.194,23
2031	50.712,81	36.228,82	31.720,35	15.266,42	4.163,80	138.092,20
2032	51.548,10	36.825,55	32.242,82	15.517,88	4.232,38	140.366,72

### 11.18.3 OPEX por manejo y disposición de Lodos (OPEX L.).

Según bibliografía [71], utilizada también para el estudio de Omar Pérez en su memoria de título [70], para una dosis de 542 [mg/l] de cal utilizada en el tratamiento, se genera una producción

de 732 [mg/l] de lechada de carbonato de calcio (dadas las concentraciones de la hipótesis de cálculo presentada anteriormente). Así, y asumiendo una humedad de los lodos de lechada del 99%, se producen 73 litros de lodos secos por cada metro cúbico de agua tratada.

De esta forma, conocida la dosis de cal necesaria (Tabla 11.38) y los caudales a tratar por cada alternativa, se obtienen los metros cúbicos a tratar y el volumen de lodos de carbonato de calcio producidos, utilizando la relación de producción de lodos secos mencionada. Así, se obtiene que el volumen de lodos producidos, superan los 1,6 millones de metros cúbicos en el primer año, llegando hasta más de 2 millones en el último año de estudio, para cada alternativa (el detalle anual de dichos metros cúbicos producidos se presenta en la Tabla 11.50 y la Tabla 11.51).

Estos volúmenes de lodos, deben ser manejados y transportados fuera de las plantas, debido a que en el estudio no se incorpora una inversión referente a infraestructura para su acumulación. Sin embargo, por la inexistencia de información de costos en función de los volúmenes de producción de lodos, estos se muestran para dimensionar su gran magnitud, que supera el millón y medio de metros cúbicos al primer año, llegando incluso a superar los dos millones transcurridos 15 años, representando así el 6,2% del volumen total de agua tratada en todo el sistema IQQ-AH, para ambas formas de tratamiento. Entonces, es necesario determinar otra relación de costos que incorpore correctamente la operación anual de dichas cantidades de lodos, la que será muy conservadora, dada la magnitud de estos. Así, y según la información de los Costos de Transporte y Disposición de Lodos (C.T.D.L.), proveniente de los estudios tarifarios realizados por las empresas sanitarias pertinentes<sup>110</sup>, se determina una relación entre dichos costos y la facturación anual de las sanitarias, en miles de metros cúbicos. Dicha relación, se muestra en el Gráfico 11.14, y sigue la tendencia mostrada por la ecuación (11.29).

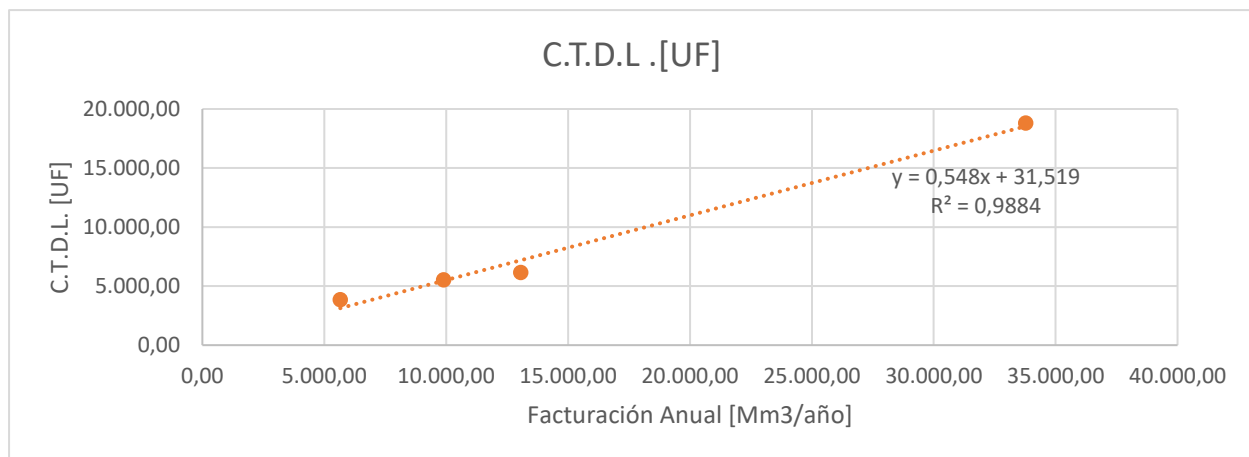


Gráfico 11.14: Costos de Transporte y Disposición de Lodos, de Empresas Sanitarias pertinentes, que poseen PTAP convencionales, en función de la facturación anual. Empresas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.29).

<sup>110</sup> Aguas del Altiplano (I y XV Región), Aguas del Valle (IV Región) y ESVAL (V Región).

$$C.T.D.L. = 0,548 * Facturación_{anual} + 31,519 \quad (11.29)$$

Con dicha relación, y con las facturaciones anuales ya determinadas para cada alternativa de aplicación, se determinan los C.T.D.L., mostrados de manera resumida por la Tabla 11.48, para un TC, y por la Tabla 11.49, para un TD (información completa se presenta en la Tabla 11.52 y la Tabla 11.53).

Tabla 11.48: Resumen de los Costos de Transporte y Disposición de Lodos anuales, por la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC.

Año	Año de estudio	C.T.D.L. PTAP		Costo C.T.D.L. Sistema IQQ-AH [UF]
		Santa Rosa	El Carmelo	
		[UF]	[UF]	
0	2017	5.787,92	5.540,25	11.328,17
1	2018	5.913,85	5.615,57	11.529,42
5	2022	6.449,25	5.911,17	12.360,42
10	2027	7.187,63	6.257,87	13.445,51
15	2032	8.032,99	6.580,70	14.613,69

Tabla 11.49: Resumen de los Costos de Transporte y Disposición de Lodos anuales, por la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD.

Año	Año de estudio	C.T.D.L. por Sectores		Costo C.T.D.L. Sistema IQQ-AH [UF]
		Alto Hospicio	Iquique	
		[UF]	[UF]	
0	2017	3.037,34	8.479,94	11.517,28
1	2018	3.101,62	8.616,91	11.718,53
5	2022	3.374,88	9.174,65	12.549,53
10	2027	3.751,59	9.883,03	13.634,62
15	2032	4.182,66	10.620,14	14.802,80

A modo de síntesis, en la Tabla 11.54 y Tabla 11.55, se presentan los OPEX, según cada tipo de costo dada la aplicación del tratamiento abatidor de los efectos de la dureza por Precipitación con cal, obteniendo finalmente, los costos totales de operación, para todo el Sistema IQQ.

### 11.18.3.1 Tablas Completas:

Tabla 11.50: Volúmenes de producción de lodos anuales, por la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TC.

Año	Año de estudio	Lodos Producidos por PTAP		Total Lodos Secos Producidos IQQ-AH [m³]
		Santa Rosa	El Carmelo	
		[m³]	[m³]	
0	2017	833.622,75	771.453,66	1.605.076,41
1	2018	851.833,89	781.977,94	1.633.811,83
2	2019	870.560,15	792.447,83	1.663.007,98
3	2020	892.135,09	805.028,29	1.697.163,38
4	2021	909.255,14	813.105,76	1.722.360,90
5	2022	929.242,08	823.263,06	1.752.505,15
6	2023	949.667,82	833.284,01	1.782.951,84
7	2024	973.200,99	845.461,09	1.818.662,08
8	2025	991.874,37	852.845,82	1.844.720,19
9	2026	1.013.675,06	862.348,79	1.876.023,85

10	2027	1.035.954,31	871.639,54	1.907.593,85
11	2028	1.061.623,23	883.109,44	1.944.732,67
12	2029	1.081.990,70	889.497,30	1.971.487,99
13	2030	1.105.769,51	898.017,96	2.003.787,47
14	2031	1.130.070,26	906.233,61	2.036.303,87
15	2032	1.158.068,51	916.622,51	2.074.691,01

Tabla 11.51: Volúmenes de producción de lodos anuales, por la aplicación de las PT de precipitación con cal según un TD.

Año	Año de estudio	Lodos Producidos por Sectores		Total Lodos Secos Producidos IQQ-AH
		Iquique	Alto Hospicio	
		[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
0	2017	1.195.704,26	410.337,87	1.606.042,13
1	2018	1.215.382,49	419.302,02	1.634.684,50
2	2019	1.235.258,91	428.519,73	1.663.778,64
3	2020	1.258.686,18	439.139,66	1.697.825,84
4	2021	1.275.336,40	447.566,74	1.722.903,14
5	2022	1.295.515,15	457.405,00	1.752.920,15
6	2023	1.315.771,07	467.459,25	1.783.230,33
7	2024	1.339.751,59	479.043,09	1.818.794,69
8	2025	1.356.461,19	488.234,77	1.844.695,96
9	2026	1.376.866,58	498.965,82	1.875.832,41
10	2027	1.397.291,50	509.932,44	1.907.223,94
11	2028	1.421.603,39	522.567,56	1.944.170,95
12	2029	1.438.132,01	532.593,14	1.970.725,15
13	2030	1.458.511,09	544.297,89	2.002.808,98
14	2031	1.478.836,58	556.259,56	2.035.096,13
15	2032	1.503.194,53	570.041,26	2.073.235,79

Tabla 11.52: Costos de Transporte y Disposición de Lodos anuales, por la aplicación de las PT de p. con cal según un TD.

Año	Año de estudio	C.T.D.L. PTAP		Costo C.T.D.L. Sistema IQQ-AH
		Santa Rosa	El Carmelo	
		[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	5.787,92	5.540,25	11.328,17
1	2018	5.913,85	5.615,57	11.529,42
2	2019	6.043,35	5.690,51	11.733,87
3	2020	6.192,55	5.780,54	11.973,09
4	2021	6.310,99	5.838,42	12.149,41
5	2022	6.449,25	5.911,17	12.360,42
6	2023	6.590,55	5.982,95	12.573,51
7	2024	6.753,34	6.070,15	12.823,49
8	2025	6.882,58	6.123,13	13.005,71
9	2026	7.033,44	6.191,25	13.224,70
10	2027	7.187,63	6.257,87	13.445,51
11	2028	7.365,26	6.340,08	13.705,34
12	2029	7.506,29	6.385,99	13.892,28
13	2030	7.670,91	6.447,15	14.118,06
14	2031	7.839,16	6.506,15	14.345,32
15	2032	8.032,99	6.580,70	14.613,69

Tabla 11.53: Costos de Transporte y Disposición de Lodos anuales, por la aplicación de las PT de p. con cal según un TD.

Año	Año de estudio	C.T.D.L. por Sectores		Costo C.T.D.L. Sistema IQQ-AH
		Alto Hospicio	Iquique	
		[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	3.037,34	8.479,94	11.517,28
1	2018	3.101,62	8.616,91	11.718,53
2	2019	3.167,73	8.755,25	11.922,98
3	2020	3.243,89	8.918,31	12.162,20
4	2021	3.304,33	9.034,20	12.338,53
5	2022	3.374,88	9.174,65	12.549,53
6	2023	3.446,99	9.315,63	12.762,62
7	2024	3.530,06	9.482,54	13.012,60
8	2025	3.595,98	9.598,85	13.194,83
9	2026	3.672,94	9.740,87	13.413,81
10	2027	3.751,59	9.883,03	13.634,62
11	2028	3.842,20	10.052,25	13.894,45
12	2029	3.914,10	10.167,29	14.081,39
13	2030	3.998,04	10.309,13	14.307,18
14	2031	4.083,83	10.450,60	14.534,43
15	2032	4.182,66	10.620,14	14.802,80

Tabla 11.54: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de precipitación con cal, como TC.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por PTAP - TC					
		Santa Rosa			El Carmelo		
		OPEX C.	OPEX Q.	OPEX L.	OPEX C.	OPEX Q.	OPEX L.
[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	
0	2017	69.408,17	77.842,82	5.787,92	67.670,31	72.037,53	5.540,25
1	2018	70.291,81	79.543,35	5.913,85	68.198,83	73.020,28	5.615,57
2	2019	71.200,53	81.291,99	6.043,35	68.724,70	73.997,94	5.690,51
3	2020	72.247,40	83.306,64	6.192,55	69.356,42	75.172,69	5.780,54
4	2021	73.078,50	84.905,29	6.310,99	69.762,57	75.926,96	5.838,42
5	2022	74.048,64	86.771,65	6.449,25	70.273,02	76.875,44	5.911,17
6	2023	75.040,17	88.678,98	6.590,55	70.776,72	77.811,18	5.982,95
7	2024	76.182,43	90.876,48	6.753,34	71.388,57	78.948,27	6.070,15
8	2025	77.089,29	92.620,19	6.882,58	71.760,32	79.637,85	6.123,13
9	2026	78.147,87	94.655,91	7.033,44	72.238,33	80.525,22	6.191,25
10	2027	79.229,79	96.736,32	7.187,63	72.705,81	81.392,78	6.257,87
11	2028	80.476,19	99.133,26	7.365,26	73.282,61	82.463,83	6.340,08
12	2029	81.465,77	101.035,15	7.506,29	73.604,77	83.060,32	6.385,99
13	2030	82.620,90	103.255,59	7.670,91	74.033,95	83.855,97	6.447,15
14	2031	83.801,51	105.524,77	7.839,16	74.447,94	84.623,14	6.506,15
15	2032	85.161,59	108.139,22	8.032,99	74.971,00	85.593,25	6.580,70

Tabla 11.55: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de precipitación con cal, como TD.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por Localidad - TD					
		Alto Hospicio			Iquique		
		OPEX C.	OPEX Q.	OPEX L.	OPEX C.	OPEX Q.	OPEX L.

		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	107.697,83	38.316,92	3.037,34	203.478,09	111.653,61	8.479,94
1	2018	108.148,93	39.153,98	3.101,62	204.439,15	113.491,14	8.616,91
2	2019	108.612,78	40.014,72	3.167,73	205.409,89	115.347,18	8.755,25
3	2020	109.147,20	41.006,40	3.243,89	206.554,06	117.534,79	8.918,31
4	2021	109.571,27	41.793,31	3.304,33	207.367,24	119.089,57	9.034,20
5	2022	110.066,35	42.712,00	3.374,88	208.352,74	120.973,84	9.174,65
6	2023	110.572,31	43.650,85	3.446,99	209.342,02	122.865,32	9.315,63
7	2024	111.155,23	44.732,54	3.530,06	210.513,20	125.104,59	9.482,54
8	2025	111.617,78	45.590,93	3.595,98	211.329,28	126.664,92	9.598,85
9	2026	112.157,79	46.592,90	3.672,94	212.325,86	128.570,35	9.740,87
10	2027	112.709,65	47.616,95	3.751,59	213.323,39	130.477,61	9.883,03
11	2028	113.345,48	48.796,81	3.842,20	214.510,76	132.747,83	10.052,25
12	2029	113.849,99	49.732,99	3.914,10	215.318,00	134.291,25	10.167,29
13	2030	114.439,00	50.825,96	3.998,04	216.313,29	136.194,23	10.309,13
14	2031	115.040,93	51.942,93	4.083,83	217.305,96	138.092,20	10.450,60
15	2032	115.734,46	53.229,85	4.182,66	218.495,58	140.366,72	10.620,14

### 11.19 ANEXO R; “CAPEX; NANOFILTRACIÓN”

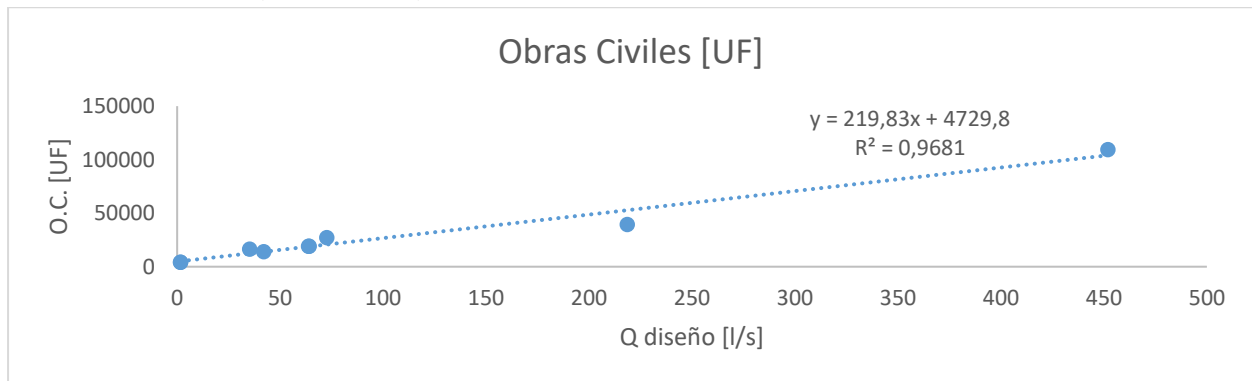


Gráfico 11.15: CAPEX de Obras Civiles de PT de Osmosis Inversa en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.30).

$$CAPEX_{O.C.} = 219,83 * Q_{diseño} + 4729,8 \quad (11.30)$$

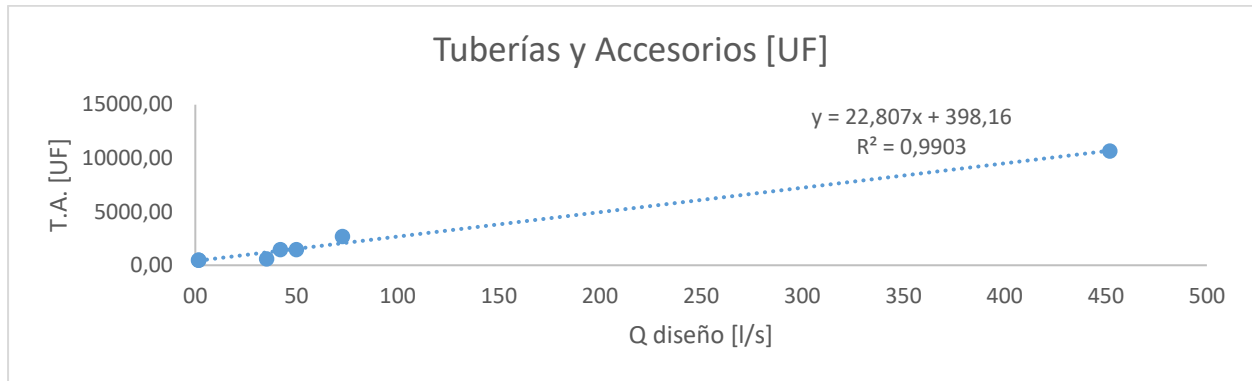


Gráfico 11.16: CAPEX de Tuberías y Accesorios de PT de Osmosis Inversa en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.31).

$$CAPEX_{T.A.} = 22,81 * Q_{diseño} + 398,16 \quad (11.31)$$

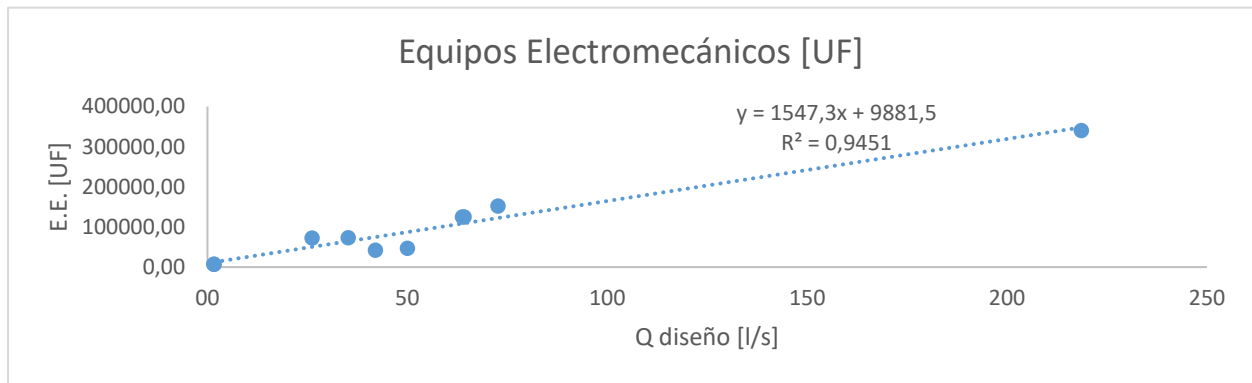


Gráfico 11.17: CAPEX de Equipos Electromecánicos de PT de Osmosis Inversa en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta modificada según supuestos, se presenta en la ecuación (11.32).

$$CAPEX_{E.E.} = (1547,3 * Q_{diseño} + 9881,5) * 90\% \quad (11.32)$$

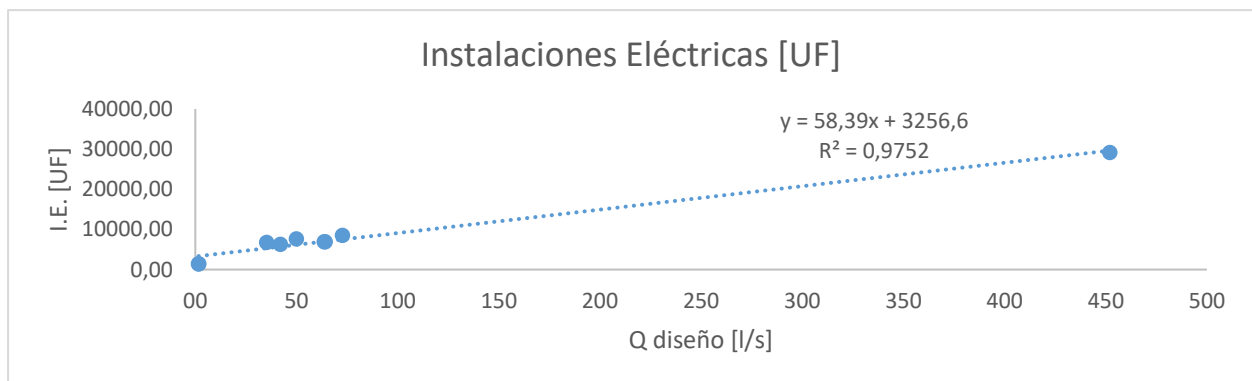


Gráfico 11.18: CAPEX de Equipos Electromecánicos de PT de Osmosis Inversa en función del caudal de diseño. Plantas seleccionadas para encontrar su línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta modificada según supuestos, se presenta en la ecuación (11.33).

$$CAPEX_{I.E.} = (58,39 * Q_{diseño} + 3256,6) * 90\% \quad (11.33)$$

Tabla 11.56: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Nanofiltración, para un TC.

Punto a Tratar (PTAP)	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
Santa Rosa	594,80	135.485,14	13.963,81	837.196,86	34.188,38	1.020.834,19
El Carmelo	470,79	108.223,92	11.135,50	664.503,65	27.671,51	811.534,58
					<b>Total [UF]</b>	<b>1.832.368,77</b>

Tabla 11.57: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Nanofiltración, para un TD.

Punto a Tratar		Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]
			O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
Alto Hospicio	AH+EB	165,97	41.214,56	4.183,39	240.015,50	11.652,73	297.066,18
	LT+ST+LN	66,44	19.334,86	1.913,41	101.412,91	6.422,32	129.083,51
	LP	60,38	18.002,26	1.775,16	92.971,19	6.103,76	118.852,37
Iquique	CV1	283,53	67.058,61	6.864,67	403.731,33	17.830,82	495.485,44
	CV2	202,55	49.257,01	5.017,78	290.962,46	13.575,30	358.812,54
	CV3	177,35	43.715,84	4.442,90	255.860,52	12.250,67	316.269,93
	LD+H	85,35	23.493,07	2.344,82	127.754,14	7.416,35	161.008,38
	C+SS	23,28	9.847,34	929,10	41.311,71	4.154,30	56.242,44
					<b>Total [UF]</b>	<b>1.932.820,80</b>	

## 11.20 ANEXOS; “OPEX; NANOFILTRACIÓN”

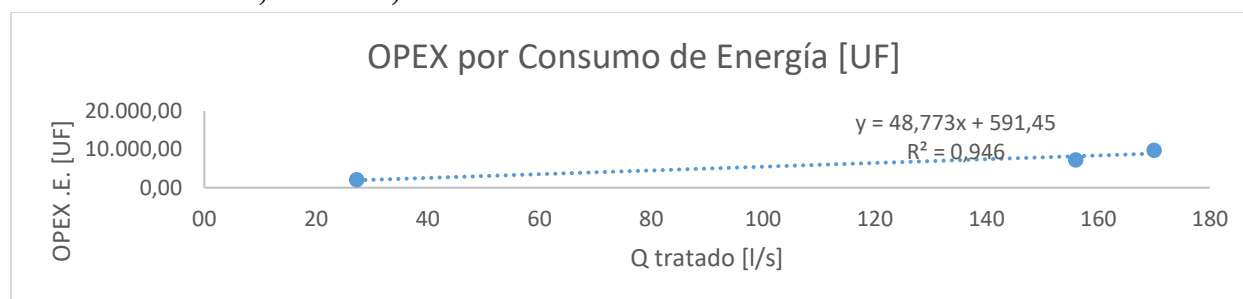


Gráfico 11.19: OPEX por consumo de energía estimados, referentes a PTAP de Nanofiltración, en función del caudal tratado anualmente. Se realiza una línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación de la recta se presenta en la ecuación (11.34).

$$OPEX E. = 48,773 * Q_{tratado\ anual} + 591,45 \quad (11.34)$$

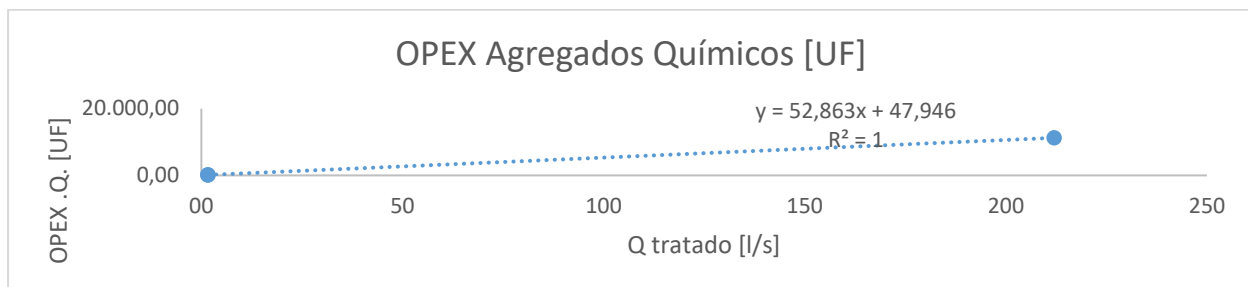


Gráfico 11.20: OPEX por consumo de agregados químicos estimados, referentes a PTAP de Osmosis Inversa, en función del caudal tratado anualmente. Se realiza una línea de tendencia, en este caso lineal, cuya ecuación se presenta en la ecuación (11.35).

$$OPEX Q. = 52,863 * Q_{tratado\ anual} + 47,946 \quad (11.35)$$

Tabla 11.58: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Nanofiltración como TC.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por PTAP - TC					
		Santa Rosa			El Carmelo		
		OPEX E. [UF]	OPEX Q. [UF]	O. OPEX [UF]	OPEX E. [UF]	OPEX Q. [UF]	O. OPEX [UF]
0	2017	21.531,39	22.743,87	22.137,63	19.969,75	21.051,27	20.510,51
1	2018	21.988,84	23.239,68	22.614,26	20.234,11	21.337,80	20.785,96
2	2019	22.459,23	23.749,51	23.104,37	20.497,11	21.622,85	21.059,98
3	2020	22.939,95	24.270,54	23.605,24	20.757,87	21.905,48	21.331,68
4	2021	23.431,22	24.803,01	24.117,11	21.016,02	22.185,28	21.600,65
5	2022	23.933,27	25.347,16	24.640,22	21.271,16	22.461,82	21.866,49
6	2023	24.446,35	25.903,27	25.174,81	21.522,88	22.734,64	22.128,76
7	2024	24.970,69	26.471,58	25.721,14	21.770,74	23.003,28	22.387,01
8	2025	25.506,55	27.052,37	26.279,46	22.014,26	23.267,23	22.640,74
9	2026	26.054,16	27.645,91	26.850,03	22.252,97	23.525,95	22.889,46
10	2027	26.613,80	28.252,47	27.433,14	22.486,34	23.778,90	23.132,62
11	2028	27.185,72	28.872,36	28.029,04	22.713,85	24.025,48	23.369,67
12	2029	27.770,20	29.505,84	28.638,02	22.934,92	24.265,09	23.600,00
13	2030	28.367,50	30.153,24	29.260,37	23.148,95	24.497,07	23.823,01
14	2031	28.977,92	30.814,84	29.896,38	23.355,32	24.720,74	24.038,03
15	2032	29.601,73	31.490,97	30.546,35	23.553,37	24.935,40	24.244,39

Tabla 11.59: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Nanofiltración como TD.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por Localidad - TD					
		Alto Hospicio			Iquique		
		OPEX E. [UF]	OPEX Q. [UF]	O. OPEX [UF]	OPEX E. [UF]	OPEX Q. [UF]	O. OPEX [UF]
0	2017	12.081,71	11.315,55	11.698,63	32.992,39	32.793,55	32.892,97
1	2018	12.306,88	11.559,61	11.933,25	33.486,69	33.329,31	33.408,00
2	2019	12.538,43	11.810,57	12.174,50	33.985,97	33.870,46	33.928,21
3	2020	12.775,05	12.067,03	12.421,04	34.488,06	34.414,65	34.451,35
4	2021	13.016,87	12.329,13	12.673,00	34.992,69	34.961,59	34.977,14
5	2022	13.264,00	12.596,99	12.930,49	35.499,56	35.510,97	35.505,27
6	2023	13.516,56	12.870,72	13.193,64	36.008,37	36.062,45	36.035,41
7	2024	13.774,65	13.150,46	13.462,56	36.518,80	36.615,68	36.567,24

8	2025	14.038,42	13.436,35	13.737,38	37.030,48	37.170,27	37.100,37
9	2026	14.307,98	13.728,51	14.018,24	37.543,05	37.725,82	37.634,43
10	2027	14.583,45	14.027,08	14.305,26	38.056,10	38.281,90	38.169,00
11	2028	14.864,97	14.332,21	14.598,59	38.569,23	38.838,06	38.703,64
12	2029	15.152,67	14.644,03	14.898,35	39.081,98	39.393,81	39.237,90
13	2030	15.446,68	14.962,70	15.204,69	39.593,89	39.948,64	39.771,27
14	2031	15.747,15	15.288,37	15.517,76	40.104,45	40.502,02	40.303,23
15	2032	16.054,21	15.621,18	15.837,69	40.613,14	41.053,36	40.833,25

## 11.21 ANEXO T; “CAPEX; INTERCAMBIO IÓNICO”

Tabla 11.60: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Intercambio Iónico, para un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	Clientes E. [cliente]	Facturación E. [Mm <sup>3</sup> /año]	Costos de Infraestructura [UF]		Sub-Total [UF]
				Equipo E.	Instalación E.	
PTAP Santa Rosa	594,80	56.461	15.678,20	687.795,81	235.220,07	923.015,88
PTAP El Carmelo	470,79	37.869	10.874,08	461.312,80	159.725,73	621.038,54
					<b>Total [UF]</b>	<b>1.544.054,4</b>

Tabla 11.61: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Intercambio Iónico, para un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	Clientes E. [cliente]	Facturación E. [Mm <sup>3</sup> /año]	Costos de Infra. [UF]		Sub-Total [UF]
				Equipo E.	Instalación E.	
AH	AH+EB	165,97	15.755	4.228,84	191.916,18	261.843,04
	LT+ST+LN	66,44	6.307	1.692,83	76.825,18	108.388,37
	LP	60,38	5.731	1.538,37	69.815,46	99.042,07
IQQ	CV1	283,53	24.364	7.011,41	296.798,36	401.685,95
	CV2	202,55	17.406	5.008,89	212.030,38	288.661,98
	CV3	177,35	15.240	4.385,57	185.644,38	253.480,64
	LD+H	85,35	7.335	2.110,69	89.347,25	125.084,46
	C+SS	23,28	2.000	575,67	24.368,77	38.446,49
					<b>Total [UF]</b>	<b>1.576.633,0</b>

### 11.21.1 Porcentajes C.INF., P. con Cal Modificada\*\*

Tabla 11.62: Desglose porcentual de cada una de las partidas que componen los C.INF. de la Precipitación con Cal modificada\*, cambiando los porcentajes de costos de Obras Civiles por el de los Equipos Electromecánicos, según un TC.

Punto a Tratar	Porcentajes según Precipitación con Cal* [%]			
	Obras Civiles	Tuberías y Accesorios	Equipos electro-mecánicos	Instalaciones eléctricas
PTAP Santa Rosa	26,4%	7,4%	62,9%	3,2%
PTAP El Carmelo	26,1%	7,4%	63,3%	3,3%

Tabla 11.63: Desglose porcentual de cada una de las partidas que componen los C.INF. de la Precipitación con Cal modificada\*, cambiando los porcentajes de costos de Obras Civiles por el de los Equipos Electromecánicos, según un TD.

Punto a Tratar		Porcentajes según Precipitación con Cal* [%]			
		Obras Civiles	Tuberías y Accesorios	Equipos electro-mecánicos	Instalaciones eléctricas
Alto Hospicio	AH+EB	24,0%	7,1%	65,6%	3,4%
	LT+ST+LN	21,2%	6,7%	68,6%	3,5%
	LP	20,9%	6,6%	69,0%	3,5%
Iquique	CV1	25,2%	7,2%	64,2%	3,3%
	CV2	24,5%	7,1%	65,0%	3,3%
	CV3	24,2%	7,1%	65,4%	3,4%
	LD+H	22,0%	6,8%	67,7%	3,4%
	C+SS	18,1%	6,2%	72,0%	3,6%

## 11.22 ANEXO U; “OPEX; INTERCAMBIO IÓNICO”

### 11.22.1 OPEX tratamiento Equivalente por Cliente (OPEX E.C.)

#### 11.22.1.1 OPEX por el Cambio de Resina (OPEX R.)

Asumiendo un solo cambio anual, para una producción doméstica de 222,3 [m<sup>3</sup>/año], se estima un costo de la resina que supera los 67.000 pesos chilenos, al 31 de diciembre de 2018. Así, utilizando el valor de la UF para dicha fecha y calculando la mitad<sup>111</sup>, se obtiene un costo de 0,0055 UF por metro cúbico de agua tratada, anualmente.

A continuación, y conocidos los caudales a tratar para cada alternativa, se obtienen los volúmenes anuales medios a tratar, en miles de metros cúbicos, y con ellos los costos anuales por cambio de resina, equivalentes para un tratamiento centralizado, tal y como muestran la Tabla 11.64 y la Tabla 11.65, para el primer y último año de estudio (información completa en la Tabla 11.71 y Tabla 11.72).

Tabla 11.64: Resumen de los volúmenes medios tratados por PTAP, y sus respectivas estimaciones de costos por el cambio anual de la resina, para la aplicación del Intercambio Iónico, según un TC.

Año	Año de estudio	Volumen Medio Tratado		Costo por Cambio Resina	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]	[UF]	[UF]
1	2018	13.835,28	12.700,70	75.702,85	69.494,72
15	2032	18.809,07	14.887,56	102.918,06	81.460,65

Tabla 11.65: Resumen de los volúmenes medios tratados por localidad, y sus respectivas estimaciones de costos por el cambio anual de la resina, para la aplicación del Intercambio Iónico, según un TD.

Año	Año de estudio	Volumen Medio Tratado		Costo por cambio Resina	
		Alto Hospicio	Iquique	Alto Hospicio	Iquique
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]	[UF]	[UF]
1	2018	6.810,20	19.739,95	37.263,56	108.011,58
15	2032	9.258,47	24.414,52	50.659,82	133.589,56

<sup>111</sup> Por concepto de economía de escala, se asume que el costo de la resina equivalente, para tratar caudales mucho mayores, disminuye al menos a la mitad.

### 11.22.1.2 OPEX por Consumo de Agua para la regeneración (OPEX A.)

Según los proveedores de ablandadores de intercambio iónico a nivel domiciliario, el agua utilizada para la regeneración de la resina se estima entre un 15 y un 20% del agua tratada en un año, tomando el menor valor para tener una estimación conservadora, dada la economía de escala. A continuación, dicha producción en [m<sup>3</sup>/año] se multiplica por el costo de producción de agua por m<sup>3</sup>, que de manera conservadora se estima con el promedio país<sup>112</sup> de 861 pesos chilenos por metro cúbico de agua, para el 31 de diciembre de 2018, equivalentes a 0,0312 [UF/m<sup>3</sup>].

De esta forma, y obtenidos los volúmenes medios tratados, presentados en la Tabla 11.64 y Tabla 11.65, se determinan los costos anuales referentes al agua utilizada para la regeneración, mostrados a continuación en la Tabla 11.66.

Tabla 11.66: Costos anuales de Operación referentes al consumo de agua para regeneración, según los volúmenes utilizados tanto en un TC, como en el TD.

Año	Año de estudio	OPEX A. T. Centralizado		OPEX A. T. Disperso	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	Alto Hospicio	Iquique
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	63.417,18	58.687,72	31.216,12	90.962,24
1	2018	64.802,58	59.488,34	31.898,06	92.459,24
2	2019	66.227,16	60.284,83	32.599,29	93.971,33
3	2020	67.868,46	61.241,88	33.407,20	95.753,54
4	2021	69.170,85	61.856,37	34.048,28	97.020,19
5	2022	70.691,34	62.629,07	34.796,72	98.555,27
6	2023	72.245,22	63.391,41	35.561,59	100.096,23
7	2024	74.035,48	64.317,77	36.442,82	101.920,52
8	2025	75.456,04	64.879,56	37.142,07	103.191,69
9	2026	77.114,51	65.602,49	37.958,42	104.744,02
10	2027	78.809,39	66.309,28	38.792,70	106.297,83
11	2028	80.762,13	67.181,84	39.753,91	108.147,33
12	2029	82.311,57	67.667,79	40.516,59	109.404,74
13	2030	84.120,53	68.315,99	41.407,02	110.955,06
14	2031	85.969,19	68.940,99	42.317,00	112.501,30
15	2032	88.099,13	69.731,32	43.365,43	114.354,31

### 11.22.1.3 OPEX por Consumo de Sal para la regeneración (OPEX S.)

Continuando con la extrapolación de costos a nivel doméstico, para alcanzar costos centralizados, el caso del consumo de sal para la regeneración depende de la capacidad de intercambio, propia del ablandador. Así, y según información de proveedores [95], los ablandadores de bajo consumo, necesitan cantidades de kilogramos de sal, equivalentes a 0,001616 veces su capacidad de remoción de dureza en [mg/l de CaCO<sub>3</sub>] por metro cúbico, para su regeneración, tal y como se muestra en la Tabla 11.67.

<sup>112</sup> Si bien el costo de producción de AP en el norte del país es mayor, se considera el promedio país para incorporar la posibilidad de utilizar agua con menos tratamientos, y por lo tanto más barata.

Tabla 11.67: Datos técnicos de ablandadores de bajo consumo, utilizados para las estimaciones de costos.

Ablandadores de Bajo Consumo; Intercambio Iónico				
Tipo	Capacidad de Intercambio	Consumo de Sal	Proporción Sal/Capacidad	Promedio
	[mg/l de CaCO <sub>3</sub> ] x m <sup>3</sup>	[Kg]		
Denver 30L	1.150	1,80	0,001565	0,001616
Danna 35L	2.100	3,50	0,001667	

A continuación, y para facilitar su operación, se estima que la capacidad de la PT equivalente debe ser capaz de regenerar solo una vez al mes. De esta forma, se obtienen las capacidades equivalentes de las PT de intercambio iónico, multiplicando los metros cúbicos de agua tratada (media mensual, dividiendo por 12), en cada punto, con la dureza estimada del sistema, para ambas alternativas en estudio. Obtenidas las capacidades de las PT en cada punto, estas se multiplican por el factor antes mencionado para obtener el consumo mensual de sal, y por consiguiente el consumo medio anual en kilogramos presentado en la Tabla 11.73.

Finalmente dado un costo, al 31 de diciembre de 2018, de 192 pesos chilenos por kilogramo de sal para ablandadores [96], se determinan los costos anuales referentes al consumo de sal para la regeneración de la resina, tal y como se muestra en el la Tabla 11.68. Cabe mencionar que, por concepto de economía de escala, se asume un valor de 100 [CLP/Kg] de sal, equivalente a 0,0036 [UF/Kg].

Tabla 11.68: Proyección de OPEX anuales, asociados al Consumo de Sal para la regeneración de la resina, para ambas alternativas de implementación.

Año	Año de estudio	OPEX S. T. Centralizado		OPEX S. T. Disperso	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	Alto Hospicio	Iquique
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	39.830,80	36.860,34	19.606,09	57.131,18
1	2018	40.700,93	37.363,19	20.034,40	58.071,42
2	2019	41.595,68	37.863,44	20.474,83	59.021,12
3	2020	42.626,54	38.464,54	20.982,25	60.140,48
4	2021	43.444,54	38.850,49	21.384,90	60.936,04
5	2022	44.399,52	39.335,81	21.854,98	61.900,18
6	2023	45.375,47	39.814,61	22.335,37	62.868,02
7	2024	46.499,90	40.396,44	22.888,85	64.013,82
8	2025	47.392,12	40.749,28	23.328,03	64.812,21
9	2026	48.433,76	41.203,34	23.840,77	65.787,18
10	2027	49.498,27	41.647,25	24.364,76	66.763,09
11	2028	50.724,74	42.195,29	24.968,47	67.924,72
12	2029	51.697,91	42.500,50	25.447,49	68.714,47
13	2030	52.834,07	42.907,62	26.006,75	69.688,19
14	2031	53.995,17	43.300,17	26.578,28	70.659,35
15	2032	55.332,93	43.796,56	27.236,78	71.823,18

#### 11.22.1.4 OPEX por Consumo de Energía (OPEX E.)

Para el caso de la estimación del consumo de energía eléctrica, de un ablandador doméstico de bajo consumo, se asume un consumo conservador permanente de 10 [W], durante 24 [hr], los 365

días del año. De esta forma, se obtiene un consumo anual, por cliente equivalente, de 87,6 [KWH/año], el que tiene un costo estimado por cliente<sup>113</sup> de aproximadamente 100 pesos chilenos por [KWH] de consumo al 2018.

Conocidos los clientes abastecidos equivalentes, correspondientes a los puntos respectivos de ambas alternativas de aplicación, en conjunto con los porcentajes de tratamiento de agua en cada punto, se determinan los Clientes Equivalentes Tratados (C.E.T.) para, luego de multiplicar por 87,6 [KWH/año], obtener el consumo anual de electricidad y por consiguiente el costo asociado, tal y como que se muestran en la Tabla 11.74 y Tabla 11.75.

A continuación, se presentan los resúmenes de OPEX asociados al tratamiento equivalente por cliente (OPEX E.C., para el primer y último año de estudio), en la Tabla 11.69 para un T. Centralizado y en la Tabla 11.70 para un T. Disperso, cuyos detalles e información completa se presentan en la Tabla 11.76 y Tabla 11.77.

Tabla 11.69: Resumen de la proyección de OPEX E.C., según un TC.

Año	Año de estudio	OPEX E.C. TOTAL		Sistema IQQ-AH
		Santa Rosa	El Carmelo	
		[UF]	[UF]	
1	2018	194.681,51	173.698,91	368.380,42
15	2032	264.425,40	207.111,82	471.537,22

Tabla 11.70: Resumen de la proyección de OPEX E.C., según un TD.

Año	Año de estudio	OPEX E.C. TOTAL		Sistema IQQ-AH
		Alto Hospicio	Iquique	
		[UF]	[UF]	
1	2018	95.828,95	272.660,42	368.489,38
15	2032	130.159,30	341.006,27	471.165,56

### 11.22.1.5 Tablas Completas:

Tabla 11.71: Volúmenes medios tratados por PTAP, y sus respectivas estimaciones de costos por el cambio anual de la resina, para la aplicación del Intercambio Iónico, según un TC.

Año	Año de estudio	Volumen Medio Tratado		Costo por Cambio Resina	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]	[UF]	[UF]
0	2017	13.539,50	12.529,76	74.084,42	68.559,43
1	2018	13.835,28	12.700,70	75.702,85	69.494,72
2	2019	14.139,43	12.870,75	77.367,06	70.425,19
3	2020	14.489,84	13.075,07	79.284,44	71.543,22
4	2021	14.767,90	13.206,27	80.805,91	72.261,07
5	2022	15.092,53	13.371,24	82.582,15	73.163,75
6	2023	15.424,28	13.534,00	84.397,40	74.054,32

<sup>113</sup> Cabe mencionar que, en la realidad, la tarifa eléctrica utilizada sería de casi la mitad, correspondiente al AT3, para grandes consumos de electricidad, principalmente ligados a industrias. Sin embargo, esta tarifa, de manera conservadora no se considera, para así incluir en dicho costo, otros no contabilizados por la estimación centralizada desde una perspectiva de aplicación doméstica. Ejemplos de esto sería el posible aumento del consumo eléctrico de plantas de mayor tamaño, o consumos indirectos asociados a la infraestructura de una planta.

7	2024	15.806,50	13.731,77	86.488,80	75.136,50
8	2025	16.109,78	13.851,72	88.148,31	75.792,78
9	2026	16.463,87	14.006,06	90.085,75	76.637,32
10	2027	16.825,72	14.156,96	92.065,72	77.462,99
11	2028	17.242,63	14.343,25	94.346,92	78.482,33
12	2029	17.573,43	14.447,00	96.156,99	79.050,02
13	2030	17.959,64	14.585,39	98.270,22	79.807,25
14	2031	18.354,33	14.718,83	100.429,84	80.537,38
15	2032	18.809,07	14.887,56	102.918,06	81.460,65

Tabla 11.72: Volúmenes medios tratados por localidad, y sus respectivas estimaciones de costos por el cambio anual de la resina, para la aplicación del Intercambio Iónico, según un TD.

Año	Año de estudio	Volumen Medio Tratado		Costo por cambio Resina	
		Alto Hospicio	Iquique	Alto Hospicio	Iquique
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]	[UF]	[UF]
0	2017	6.664,61	19.420,34	36.466,91	106.262,76
1	2018	6.810,20	19.739,95	37.263,56	108.011,58
2	2019	6.959,91	20.062,78	38.082,74	109.778,00
3	2020	7.132,40	20.443,28	39.026,54	111.860,00
4	2021	7.269,27	20.713,71	39.775,45	113.339,71
5	2022	7.429,06	21.041,44	40.649,78	115.133,00
6	2023	7.592,36	21.370,44	41.543,31	116.933,16
7	2024	7.780,50	21.759,92	42.572,77	119.064,32
8	2025	7.929,79	22.031,31	43.389,64	120.549,30
9	2026	8.104,08	22.362,73	44.343,31	122.362,74
10	2027	8.282,20	22.694,47	45.317,92	124.177,91
11	2028	8.487,42	23.089,34	46.440,81	126.338,52
12	2029	8.650,25	23.357,79	47.331,79	127.807,43
13	2030	8.840,35	23.688,78	48.371,99	129.618,52
14	2031	9.034,63	24.018,91	49.435,03	131.424,86
15	2032	9.258,47	24.414,52	50.659,82	133.589,56

Tabla 11.73: Proyección del consumo anual de sal, para la regeneración de la resina, para ambas alternativas de implementación.

Año	Año de estudio	Consumo de Sal - TC		Consumo de Sal - TD	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	Alto Hospicio	Iquique
		[Kg]	[Kg]	[Kg]	[Kg]
0	2017	10.979.673,86	10.160.842,67	5.404.574,13	15.748.661,86
1	2018	11.219.533,42	10.299.458,29	5.522.641,27	16.007.844,48
2	2019	11.466.177,70	10.437.357,58	5.644.048,10	16.269.637,53
3	2020	11.750.341,95	10.603.055,26	5.783.923,54	16.578.198,91
4	2021	11.975.830,64	10.709.443,95	5.894.916,85	16.797.499,57
5	2022	12.239.079,41	10.843.226,06	6.024.496,97	17.063.274,49
6	2023	12.508.107,51	10.975.212,35	6.156.921,88	17.330.065,99
7	2024	12.818.063,71	11.135.597,05	6.309.493,01	17.645.914,26
8	2025	13.064.011,40	11.232.861,62	6.430.556,95	17.865.996,88
9	2026	13.351.149,03	11.358.025,50	6.571.895,99	18.134.757,07
10	2027	13.644.589,81	11.480.394,30	6.716.337,66	18.403.774,40
11	2028	13.982.675,97	11.631.464,80	6.882.755,33	18.723.987,03

12	2029	14.250.936,64	11.715.599,44	7.014.802,49	18.941.686,15
13	2030	14.564.128,25	11.827.825,34	7.168.966,20	19.210.099,69
14	2031	14.884.194,24	11.936.034,02	7.326.513,71	19.477.807,36
15	2032	15.252.960,07	12.072.866,51	7.508.032,98	19.798.626,82

Tabla 11.74: Proyección anual de cantidades de Clientes Equivalentes Tratados, para ambas alternativas de implementación.

Año	Año de estudio	C.E.T. - TC		C.E.T. - TD	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	Alto Hospicio	Iquique
		[cliente]	[cliente]	[cliente]	[cliente]
0	2017	41.218	22.144	20.289	42.833
1	2018	42.092	22.967	20.719	44.101
2	2019	42.984	23.818	21.158	45.406
3	2020	43.896	24.698	21.607	46.750
4	2021	44.826	25.607	22.065	48.134
5	2022	45.777	26.547	22.533	49.559
6	2023	46.747	27.519	23.011	51.026
7	2024	47.738	28.523	23.498	52.536
8	2025	48.750	29.561	23.997	54.091
9	2026	49.784	30.634	24.505	55.692
10	2027	50.839	31.743	25.025	57.341
11	2028	51.917	32.889	25.555	59.038
12	2029	53.017	34.074	26.097	60.785
13	2030	54.141	35.298	26.650	62.585
14	2031	55.289	36.563	27.215	64.437
15	2032	56.461	37.869	27.792	66.345

Tabla 11.75: Proyección anual de OPEX por Consumo de Energía eléctrica, para ambas alternativas de implementación.

Año	Año de estudio	OPEX E. - TC		OPEX E. - TD	
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	Alto Hospicio	Iquique
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	13.195,41	7.089,22	6.495,23	13.712,30
1	2018	13.475,15	7.352,65	6.632,93	14.118,19
2	2019	13.760,82	7.625,02	6.773,55	14.536,08
3	2020	14.052,55	7.906,61	6.917,15	14.966,35
4	2021	14.350,47	8.197,72	7.063,79	15.409,36
5	2022	14.654,70	8.498,66	7.213,55	15.865,47
6	2023	14.965,38	8.809,74	7.366,47	16.335,09
7	2024	15.282,64	9.131,29	7.522,64	16.818,61
8	2025	15.606,63	9.463,65	7.682,12	17.316,44
9	2026	15.937,49	9.807,16	7.844,98	17.829,01
10	2027	16.275,37	10.162,18	8.011,30	18.356,75
11	2028	16.620,41	10.529,08	8.181,14	18.900,11
12	2029	16.972,76	10.908,25	8.354,58	19.459,55
13	2030	17.332,58	11.300,07	8.531,69	20.035,55
14	2031	17.700,03	11.704,94	8.712,57	20.628,60
15	2032	18.075,27	12.123,30	8.897,27	21.239,21

Tabla 11.76: Proyección anual unificada, de cada tipo de costo de operación según tratamiento por cliente, para un TC.

OPEX tratamiento Equivalente por Cliente, según PTAP – T. Centralizado							
Santa Rosa				El Carmelo			
OPEX R.	OPEX A.	OPEX S.	OPEX E.	OPEX R.	OPEX A.	OPEX S.	OPEX E.
[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
74.084,42	63.417,18	39.830,80	13.195,41	68.559,43	58.687,72	36.860,34	7.089,22
75.702,85	64.802,58	40.700,93	13.475,15	69.494,72	59.488,34	37.363,19	7.352,65
77.367,06	66.227,16	41.595,68	13.760,82	70.425,19	60.284,83	37.863,44	7.625,02
79.284,44	67.868,46	42.626,54	14.052,55	71.543,22	61.241,88	38.464,54	7.906,61
80.805,91	69.170,85	43.444,54	14.350,47	72.261,07	61.856,37	38.850,49	8.197,72
82.582,15	70.691,34	44.399,52	14.654,70	73.163,75	62.629,07	39.335,81	8.498,66
84.397,40	72.245,22	45.375,47	14.965,38	74.054,32	63.391,41	39.814,61	8.809,74
86.488,80	74.035,48	46.499,90	15.282,64	75.136,50	64.317,77	40.396,44	9.131,29
88.148,31	75.456,04	47.392,12	15.606,63	75.792,78	64.879,56	40.749,28	9.463,65
90.085,75	77.114,51	48.433,76	15.937,49	76.637,32	65.602,49	41.203,34	9.807,16
92.065,72	78.809,39	49.498,27	16.275,37	77.462,99	66.309,28	41.647,25	10.162,18
94.346,92	80.762,13	50.724,74	16.620,41	78.482,33	67.181,84	42.195,29	10.529,08
96.156,99	82.311,57	51.697,91	16.972,76	79.050,02	67.667,79	42.500,50	10.908,25
98.270,22	84.120,53	52.834,07	17.332,58	79.807,25	68.315,99	42.907,62	11.300,07
100.429,84	85.969,19	53.995,17	17.700,03	80.537,38	68.940,99	43.300,17	11.704,94
102.918,06	88.099,13	55.332,93	18.075,27	81.460,65	69.731,32	43.796,56	12.123,30

Tabla 11.77: Proyección anual unificada, de cada tipo de costo de operación según tratamiento por cliente, para un TD.

OPEX tratamiento Equivalente por Cliente, según Localidad – T. Disperso							
Alto Hospicio				Iquique			
OPEX R.	OPEX A.	OPEX S.	OPEX E.	OPEX R.	OPEX A.	OPEX S.	OPEX E.
[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
36.466,91	31.216,12	19.606,09	6.495,23	106.262,8	90.962,24	57.131,18	13.712,30
37.263,56	31.898,06	20.034,40	6.632,93	108.011,6	92.459,24	58.071,42	14.118,19
38.082,74	32.599,29	20.474,83	6.773,55	109.778,0	93.971,33	59.021,12	14.536,08
39.026,54	33.407,20	20.982,25	6.917,15	111.860,0	95.753,54	60.140,48	14.966,35
39.775,45	34.048,28	21.384,90	7.063,79	113.339,7	97.020,19	60.936,04	15.409,36
40.649,78	34.796,72	21.854,98	7.213,55	115.133,0	98.555,27	61.900,18	15.865,47
41.543,31	35.561,59	22.335,37	7.366,47	116.933,2	100.096,23	62.868,02	16.335,09
42.572,77	36.442,82	22.888,85	7.522,64	119.064,3	101.920,52	64.013,82	16.818,61
43.389,64	37.142,07	23.328,03	7.682,12	120.549,3	103.191,69	64.812,21	17.316,44
44.343,31	37.958,42	23.840,77	7.844,98	122.362,7	104.744,02	65.787,18	17.829,01
45.317,92	38.792,70	24.364,76	8.011,30	124.177,9	106.297,83	66.763,09	18.356,75
46.440,81	39.753,91	24.968,47	8.181,14	126.338,5	108.147,33	67.924,72	18.900,11
47.331,79	40.516,59	25.447,49	8.354,58	127.807,4	109.404,74	68.714,47	19.459,55
48.371,99	41.407,02	26.006,75	8.531,69	129.618,5	110.955,06	69.688,19	20.035,55
49.435,03	42.317,00	26.578,28	8.712,57	131.424,9	112.501,30	70.659,35	20.628,60
50.659,82	43.365,43	27.236,78	8.897,27	133.589,6	114.354,31	71.823,18	21.239,21

### 11.22.2 OPEX transporte y disposición de Lodos (OPEX L.)

Para incorporar correctamente la operación anual del agua utilizada para la regeneración mensual de la resina, esta se considera equivalente a gestionar lodos, por lo que se utiliza la información de los Costos de Transporte y Disposición de Lodos (C.T.D.L.) presentada anteriormente en el Gráfico 11.14, que determina una relación entre dichos costos y la facturación anual de las sanitarias, en miles de metros cúbicos.

Con dicha relación, y dado que se mantienen las facturaciones anuales ya determinadas para cada alternativa de aplicación, los C.T.D.L. son los mismos que los presentados en la estimación de costos operacionales de la Precipitación con Cal, y particularmente en la Tabla 11.48 para un TC y la Tabla 11.49 para un TD, siendo equivalentes a los OPEX L. respectivos.

Esta hipótesis de equivalencia entre ambos tratamientos se corrobora al calcular los volúmenes de agua para regeneración, que si bien resultan ser mucho mayores que los lodos secos de lechada de carbonato de calcio para la Precipitación con Cal (los valores superan los 3,9 millones de metros cúbicos en el primer año, llegando hasta más de 5 millones en el último año de estudio, para cada alternativa, cuyo detalle anual se presenta en la Tabla 11.78 y la Tabla 11.79), se considera una recuperación de gran parte del agua de la regeneración, antes de su disposición como “lodos”<sup>114</sup>. Además, se entiende que la gestión de dichos “lodos” será distinta para cada tratamiento, por lo que para un análisis más recatado es necesario una Ingeniería de Detalles.

Tabla 11.78: Proyección de volúmenes de agua utilizada para la regeneración de la resina, referente al 15% del agua tratada, para un TC.

Año	Año de estudio	"Lodos" Producidos por PTAP		Total "Lodos" Producidos IQQ-AH [Mm <sup>3</sup> ]
		Santa Rosa	El Carmelo	
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]	
0	2017	2.030,92	1.879,46	3.910,39
1	2018	2.075,29	1.905,10	3.980,40
2	2019	2.120,91	1.930,61	4.051,53
3	2020	2.173,48	1.961,26	4.134,74
4	2021	2.215,19	1.980,94	4.196,13
5	2022	2.263,88	2.005,69	4.269,56
6	2023	2.313,64	2.030,10	4.343,74
7	2024	2.370,97	2.059,77	4.430,74
8	2025	2.416,47	2.077,76	4.494,22
9	2026	2.469,58	2.100,91	4.570,49
10	2027	2.523,86	2.123,54	4.647,40
11	2028	2.586,39	2.151,49	4.737,88
12	2029	2.636,01	2.167,05	4.803,06
13	2030	2.693,95	2.187,81	4.881,75
14	2031	2.753,15	2.207,82	4.960,97
15	2032	2.821,36	2.233,13	5.054,49

<sup>114</sup> Asumiendo que estos “lodos” pasarían por procesos de secado o similares, para la reutilización de grandes cantidades de agua.

Tabla 11.79: Proyección de volúmenes de agua utilizada para la regeneración de la resina, referente al 15% del agua tratada, para un TD.

Año	Año de estudio	"Lodos" Producidos por Sectores		Total "Lodos" Producidos IQQ-AH [Mm <sup>3</sup> ]
		Alto Hospicio	Iquique	
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]	
0	2017	999,69	2.913,05	3.912,74
1	2018	1.021,53	2.960,99	3.982,52
2	2019	1.043,99	3.009,42	4.053,40
3	2020	1.069,86	3.066,49	4.136,35
4	2021	1.090,39	3.107,06	4.197,45
5	2022	1.114,36	3.156,22	4.270,58
6	2023	1.138,85	3.205,57	4.344,42
7	2024	1.167,08	3.263,99	4.431,06
8	2025	1.189,47	3.304,70	4.494,17
9	2026	1.215,61	3.354,41	4.570,02
10	2027	1.242,33	3.404,17	4.646,50
11	2028	1.273,11	3.463,40	4.736,51
12	2029	1.297,54	3.503,67	4.801,21
13	2030	1.326,05	3.553,32	4.879,37
14	2031	1.355,19	3.602,84	4.958,03
15	2032	1.388,77	3.662,18	5.050,95

### 11.22.3 OPEX Servicios de Operación y mantención (OPEX O.)

Finalmente, el único aspecto que se no está considerando, son los costos referentes a los servicios de operación y mantención de las plantas proyectadas. Así, tal y como se presenta en el detalle de estos costos directos de operación, de los estudios tarifarios (ANEXO P; “Costos Directos de Operación y Mantención”), estos servicios representan el 26,06% de todo el costo, según lo presentado por las sanitarias pertinentes. Luego, dicho valor se promedia con el presentado por los estudios de la SISS, obteniendo un 23,68%, el cual se utiliza para calcular este aspecto, y donde el 76,32% restante corresponde a la suma de los costos operacionales ya calculados (OPEX E.C. Y OPEX L.).

De esta forma, se obtiene la estimación de los OPEX O., resumida para el primer y último año de estudio, por la *Tabla 11.80* para un TC, y la *Tabla 11.81* para un TD (información completa en las respectivas, *Tabla 11.82* y *Tabla 11.83*).

Tabla 11.80: Resumen de la estimación proyectada de los OPEX O., dada la aplicación de un TC.

Año	Año de estudio	OPEX O. por PTAP		Total Sistema IQQ-AH [UF]
		Santa Rosa	El Carmelo	
		[UF]	[UF]	
1	2018	62.247,45	55.643,70	117.891,15
15	2032	84.547,52	66.311,67	150.859,19

Tabla 11.81: Resumen de la estimación proyectada de los OPEX O., dada la aplicación de un TD.

Año	Año de estudio	OPEX O. por Sectores		Total Sistema IQQ-AH [UF]
		Iquique	Alto Hospicio	
		[UF]	[UF]	
1	2018	30.699,49	87.284,15	117.983,65
15	2032	41.688,12	109.114,42	150.802,54

### 11.22.3.1 Tablas Completas:

Tabla 11.82: Estimación proyectada de los OPEX por Servicios de Operación y mantención, según un TC.

Año	Año de estudio	OPEX O. por PTAP		Total Sistema IQQ-AH [UF]
		Santa Rosa	El Carmelo	
		[UF]	[UF]	
0	2017	60.919,42	54.843,86	115.763,28
1	2018	62.247,45	55.643,70	117.891,15
2	2019	63.612,43	56.442,61	120.055,04
3	2020	65.173,45	57.388,38	122.561,83
4	2021	66.432,77	58.029,89	124.462,65
5	2022	67.889,45	58.816,34	126.705,79
6	2023	69.378,03	59.596,65	128.974,68
7	2024	71.080,46	60.527,31	131.607,77
8	2025	72.453,76	61.134,37	133.588,13
9	2026	74.042,34	61.889,41	135.931,75
10	2027	75.665,72	62.633,54	138.299,26
11	2028	77.522,35	63.530,05	141.052,40
12	2029	79.019,94	64.083,63	143.103,57
13	2030	80.752,36	64.786,66	145.539,02
14	2031	82.522,72	65.472,93	147.995,65
15	2032	84.547,52	66.311,67	150.859,19

Tabla 11.83: Estimación proyectada de los OPEX por Servicios de Operación y mantención, dada la aplicación según un TD.

Año	Año de estudio	OPEX O. por Sectores		Total Sistema IQQ-AH [UF]
		Iquique	Alto Hospicio	
		[UF]	[UF]	
0	2017	30.045,08	85.816,71	115.861,79
1	2018	30.699,49	87.284,15	117.983,65
2	2019	31.372,12	88.768,83	120.140,95
3	2020	32.141,35	90.499,42	122.640,77
4	2021	32.761,89	91.771,96	124.533,85
5	2022	33.479,69	93.289,11	126.768,80
6	2023	34.213,22	94.815,71	129.028,93
7	2024	35.052,13	96.600,53	131.652,66
8	2025	35.728,83	97.894,13	133.622,96
9	2026	36.511,62	99.444,25	135.955,87
10	2027	37.311,56	101.000,41	138.311,96
11	2028	38.226,44	102.826,39	141.052,83
12	2029	38.964,38	104.126,77	143.091,15
13	2030	39.818,03	105.694,78	145.512,81
14	2031	40.690,39	107.264,43	147.954,81
15	2032	41.688,12	109.114,42	150.802,54

Tabla 11.84: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Intercambio Iónico para un TC.

		Costos de Operación por PTAP – T. Centralizado					
Año	Año de estudio	Santa Rosa			El Carmelo		
		OPEX E.C.	OPEX L.	OPEX O.	OPEX E.C.	OPEX L.	OPEX O.
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	190.527,81	5.787,92	60.919,42	171.196,70	5.540,25	54.843,86
1	2018	194.681,51	5.913,85	62.247,45	173.698,91	5.615,57	55.643,70
2	2019	198.950,73	6.043,35	63.612,43	176.198,48	5.690,51	56.442,61
3	2020	203.831,99	6.192,55	65.173,45	179.156,25	5.780,54	57.388,38
4	2021	207.771,76	6.310,99	66.432,77	181.165,64	5.838,42	58.029,89
5	2022	212.327,72	6.449,25	67.889,45	183.627,29	5.911,17	58.816,34
6	2023	216.983,46	6.590,55	69.378,03	186.070,08	5.982,95	59.596,65
7	2024	222.306,82	6.753,34	71.080,46	188.982,00	6.070,15	60.527,31
8	2025	226.603,11	6.882,58	72.453,76	190.885,27	6.123,13	61.134,37
9	2026	231.571,52	7.033,44	74.042,34	193.250,30	6.191,25	61.889,41
10	2027	236.648,75	7.187,63	75.665,72	195.581,70	6.257,87	62.633,54
11	2028	242.454,21	7.365,26	77.522,35	198.388,54	6.340,08	63.530,05
12	2029	247.139,23	7.506,29	79.019,94	200.126,56	6.385,99	64.083,63
13	2030	252.557,40	7.670,91	80.752,36	202.330,93	6.447,15	64.786,66
14	2031	258.094,23	7.839,16	82.522,72	204.483,49	6.506,15	65.472,93
15	2032	264.425,40	8.032,99	84.547,52	207.111,82	6.580,70	66.311,67

Tabla 11.85: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Intercambio Iónico para un TD.

		Costos de Operación por Localidad – T. Disperso					
Año	Año de estudio	Alto Hospicio			Iquique		
		OPEX E.C.	OPEX L.	OPEX O.	OPEX E.C.	OPEX L.	OPEX O.
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	93.784,36	3.037,34	30.045,08	268.068,49	8.479,94	85.816,71
1	2018	95.828,95	3.101,62	30.699,49	272.660,42	8.616,91	87.284,15
2	2019	97.930,41	3.167,73	31.372,12	277.306,53	8.755,25	88.768,83
3	2020	100.333,13	3.243,89	32.141,35	282.720,37	8.918,31	90.499,42
4	2021	102.272,43	3.304,33	32.761,89	286.705,29	9.034,20	91.771,96
5	2022	104.515,03	3.374,88	33.479,69	291.453,93	9.174,65	93.289,11
6	2023	106.806,74	3.446,99	34.213,22	296.232,49	9.315,63	94.815,71
7	2024	109.427,08	3.530,06	35.052,13	301.817,27	9.482,54	96.600,53
8	2025	111.541,86	3.595,98	35.728,83	305.869,64	9.598,85	97.894,13
9	2026	113.987,49	3.672,94	36.511,62	310.722,95	9.740,87	99.444,25
10	2027	116.486,68	3.751,59	37.311,56	315.595,58	9.883,03	101.000,41
11	2028	119.344,32	3.842,20	38.226,44	321.310,68	10.052,25	102.826,39
12	2029	121.650,45	3.914,10	38.964,38	325.386,18	10.167,29	104.126,77
13	2030	124.317,46	3.998,04	39.818,03	330.297,32	10.309,13	105.694,78
14	2031	127.042,88	4.083,83	40.690,39	335.214,11	10.450,60	107.264,43
15	2032	130.159,30	4.182,66	41.688,12	341.006,27	10.620,14	109.114,42

## 11.23 ANEXO V; “COSTOS SISTEMA ANTICAL ELECTRÓNICO”

### 11.23.1 CAPEX; Estimación según PEAP de Gran Caudal

Según la información del promedio de los costos de cada componente de la inversión de plantas elevadoras de agua potable, que elevan grandes caudales en los sistemas de Aguas del Altiplano (ADA), en particular las plantas de Arica (PEAP Lluta y Estadio), con 200,6 y 206,3 [l/s] de máxima capacidad, y una planta de Iquique (PEAP El Carmelo), con 902,8 [l/s], se obtienen los porcentajes presentados en la Tabla 11.86.

Tabla 11.86: Promedio de los porcentajes de cada ítem de los CAPEX, para PEAP de gran caudal de diseño, en los sistemas de producción de Aguas del Altiplano.

CAPEX PEAP ADA Gran Caudal [%]				
O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	Total
46%	14%	17%	23%	100%

### 11.23.2 CAPEX

Tabla 11.87: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Sistema Antical Electrónico como un TC.

PTAP a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	I.E.	
Santa Rosa	830,48	888,89	5.314,52	1.617,46	3.465,99	1.155,33	11.553,31
El Carmelo	679,74	700,00	4.185,19	1.273,75	2.729,47	909,82	9.098,23
						Total [UF]	20.651,55

Tabla 11.88: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Sistema Antical Electrónico, como un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	I.E.		
Alto Hospicio	AH+EB	235,38	241,67	1.444,89	439,75	942,32	314,11	3.141,06
	LT+ST+LN	94,23	97,22	581,28	176,91	379,09	126,36	1.263,64
	LP	85,63	97,22	581,28	176,91	379,09	126,36	1.263,64
Iquique	CV1	402,12	444,44	2.657,26	808,73	1.733,00	577,67	5.776,66
	CV2	287,27	319,44	1.909,91	581,28	1.245,59	415,20	4.151,97
	CV3	251,52	255,56	1.527,93	465,02	996,47	332,16	3.321,58
	LD+H	121,05	138,89	830,39	252,73	541,56	180,52	1.805,21
	C+SS	33,02	33,33	199,29	60,65	129,97	43,32	433,25
						Total [UF]	21.157,00	

### 11.23.3 OPEX

Tabla 11.89: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico para un TC.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por PTAP – T. Centralizado			
		Santa Rosa		El Carmelo	
		OPEX Snt. [UF]	OPEX E. [UF]	OPEX Snt. [UF]	OPEX E. [UF]
0	2017	27.605,52	0,42	26.914,33	0,39
1	2018	27.956,97	0,42	27.124,53	0,39
2	2019	28.318,39	0,42	27.333,69	0,39
3	2020	28.734,76	0,42	27.584,94	0,39
4	2021	29.065,31	0,42	27.746,48	0,39
5	2022	29.451,16	0,42	27.949,50	0,39
6	2023	29.845,52	0,42	28.149,83	0,39
7	2024	30.299,83	0,42	28.393,18	0,39
8	2025	30.660,51	0,42	28.541,04	0,39
9	2026	31.081,54	0,42	28.731,16	0,39
10	2027	31.511,85	0,42	28.917,08	0,39
11	2028	32.007,57	0,42	29.146,49	0,39
12	2029	32.401,16	0,42	29.274,62	0,39
13	2030	32.860,58	0,42	29.445,32	0,39
14	2031	33.330,15	0,42	29.609,98	0,39
15	2032	33.871,09	0,42	29.818,01	0,39

Tabla 11.90: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico para un TD.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por Localidad – T. Disperso			
		Alto Hospicio		Iquique	
		OPEX Snt. [UF]	OPEX E. [UF]	OPEX Snt. [UF]	OPEX E. [UF]
0	2017	42.834,36	0,28	80.928,79	0,75
1	2018	43.013,78	0,28	81.311,03	0,75
2	2019	43.198,27	0,28	81.697,12	0,75
3	2020	43.410,82	0,28	82.152,18	0,75
4	2021	43.579,48	0,28	82.475,61	0,75
5	2022	43.776,39	0,28	82.867,57	0,75
6	2023	43.977,62	0,28	83.261,03	0,75
7	2024	44.209,47	0,28	83.726,84	0,75
8	2025	44.393,43	0,28	84.051,42	0,75
9	2026	44.608,21	0,28	84.447,78	0,75
10	2027	44.827,70	0,28	84.844,53	0,75
11	2028	45.080,59	0,28	85.316,78	0,75
12	2029	45.281,24	0,28	85.637,84	0,75
13	2030	45.515,51	0,28	86.033,69	0,75
14	2031	45.754,92	0,28	86.428,51	0,75
15	2032	46.030,75	0,28	86.901,65	0,75

## 11.24 ANEXO W; “COSTOS SISTEMA DESINCRUSTANTE MAGNÉTICO”

### 11.24.1 Estimación de Capacidad de Caudal según Catálogo

Se realiza la presente relación lineal con los datos de los 2 equipos bridados (equipos de 8 y 28 [“], con una capacidad de 3.750 y 45.000 [l/min] respectivamente) de los que se tiene información de costos, para obtener las capacidades de los equipos mayores a 8 [“] según la ecuación (11.36). Además, se asume que por las características de la fábrica (desconocidas en detalle, por confidencialidad), entre las 8 [“] y las 28 [“] de diámetro, solo se pueden fabricar equipos cada una pulgada de aumento, llegando así hasta aquellos capaces de tratar caudales de 45.000 [l/min], de 28 [“] mencionadas.

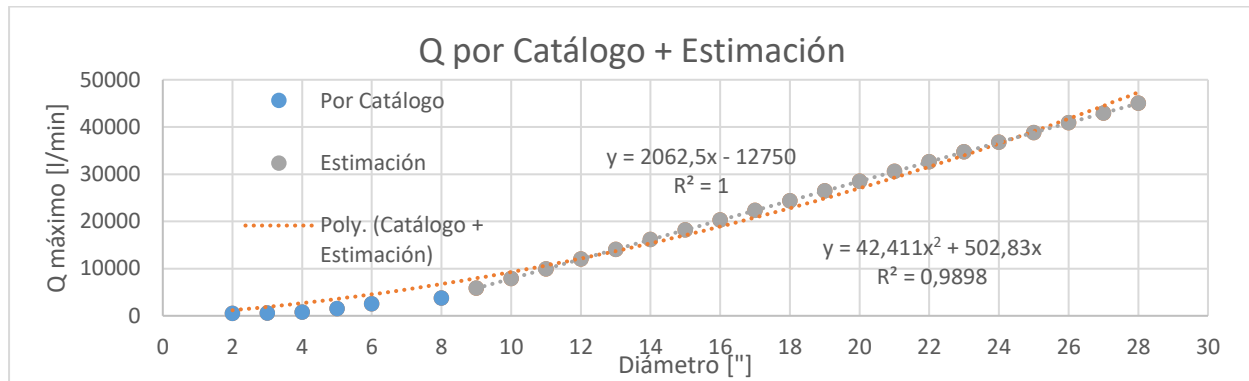


Gráfico 11.21: Caudal máximo de capacidad en función del diámetro, para equipos bridados presentes en los catálogos de los equipos S.D.M., en conjunto con la estimación de capacidades mencionada.

$$Q_{\text{máximo}} = 2062,5 * \text{Diámetro} - 12750 \quad (11.36)$$

Además, en la gráfica anterior también se muestra la ecuación (11.37), que representa una estimación polinómica del aumento de las capacidades de todos los equipos (incluyendo los conocidos por catálogo), según como aumentan de diámetro. Sin embargo, dicha relación es solo ilustrativa, debido a que sobreestima los costos para diámetros pequeños y muy grandes, por lo que de forma conservadora, se elige la relación lineal presentada en la ecuación (11.36) para el estudio.

$$Q_{\text{máximo}} = 42,41 * \text{Diámetro}^2 + 580,83 * \text{Diámetro} \quad (11.37)$$

### 11.24.2 CAPEX

Tabla 11.91: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de Sistema Desincrustante Magnético, como TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX [UF]			Sub-Total [UF]
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	
PTAP Santa Rosa	830,48	846,88	18.747,01	5.705,61	16.301,74	40.754,36
PTAP El Carmelo	679,74	681,25	15.030,60	4.574,53	13.070,09	32.675,22
					Total [UF]	73.429,58

Tabla 11.92: Resumen de los CAPEX de la aplicación de las PT de S.D.M., como TD.

Punto a Tratar		Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX [UF]			Sub-Total [UF]
				O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	
Alto Hospicio	AH+EB	235,38	268,75	5.979,24	1.819,77	5.199,34	12.998,35
	LT+ST+LN	94,23	96,88	2.207,84	671,95	1.919,86	4.799,66
	LP	85,63	96,88	2.207,84	671,95	1.919,86	4.799,66
Iquique	CV1	402,12	406,25	8.996,36	2.738,02	7.822,92	19.557,31
	CV2	287,27	303,13	6.733,52	2.049,33	5.855,24	14.638,09
	CV3	251,52	268,75	5.979,24	1.819,77	5.199,34	12.998,35
	LD+H	121,05	131,25	2.962,12	901,52	2.575,76	6.439,40
	C+SS	33,02	41,67	996,42	303,26	866,46	2.166,14
						Total [UF]	78.396,97

## 11.25 ANEXO X; “VALORIZACIÓN DE CAPEX PARA INTERCAMBIO IÓNICO”

Tabla 11.93: Actualización de la valorización de los CAPEX de cada partida del tratamiento Intercambio Iónico, según los porcentajes presentados en el ANEXO T; “CAPEX; Intercambio Iónico”, para un TC.

Punto a Tratar		Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]			Sub-Total [UF]	
			O.C.	T.A.	E.E.		I.E.
PTAP Santa Rosa		594,80	243.762,39	68.429,58	580.844,51	29.979,41	923.015,88
PTAP El Carmelo		470,79	162.134,57	45.775,03	392.871,43	20.257,51	621.038,54
						Total [UF]	1.544.054,42

Tabla 11.94: Actualización de la valorización de los CAPEX de cada partida del tratamiento Intercambio Iónico, según los porcentajes presentados en el ANEXO T; “CAPEX; Intercambio Iónico”, para un TD.

Punto a Tratar		Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]
			O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
Alto Hospicio	AH+EB	165,97	62.832,96	18.514,24	171.700,91	8.794,94	261.843,04
	LT+ST+LN	66,44	23.000,38	7.236,19	74.372,93	3.778,88	108.388,37
	LP	60,38	20.710,88	6.568,69	68.295,41	3.467,10	99.042,07
Iquique	CV1	283,53	101.406,32	29.115,11	257.902,93	13.261,58	401.685,95
	CV2	202,55	70.727,17	20.617,85	187.688,22	9.628,73	288.661,98
	CV3	177,35	61.265,72	17.985,41	165.735,64	8.493,87	253.480,64
	LD+H	85,35	27.552,27	8.494,25	84.723,33	4.314,62	125.084,46
	C+SS	23,28	6.964,89	2.397,10	27.689,24	1.395,26	38.446,49
						Total [UF]	1.576.633,01

## 11.27 ANEXO Y; “CAPEX ANUALIZADOS; TODOS LOS TRATAMIENTOS”

Tabla 11.95: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Precipitación con Cal según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]				Sub-Total [UF/año]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
PTAP Santa Rosa	594,80	5.050,08	614,46	2.851,42	350,68	8.866,64
PTAP El Carmelo	470,79	4.125,52	496,44	2.290,65	286,20	7.198,81
					Total [UF/año]	16.065,46

Tabla 11.96: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Precipitación con Cal según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]				Sub-Total [UF/año]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
PTAP Santa Rosa	594,80	9.505,51	1.011,82	119.198,00	132.942,46	3.099,21
	LT+ST+LN	66,44	1.110,85	111,63	462,20	1.760,61
	LP	60,38	1.065,65	105,86	434,79	1.679,09
Iquique	CV1	283,53	2.729,40	318,23	1.443,88	4.680,34
	CV2	202,55	2.125,66	241,16	1.077,70	3.591,24
	CV3	177,35	1.937,73	217,18	963,72	3.252,23
	LD+H	85,35	1.251,87	129,63	547,74	2.015,01
	C+SS	23,28	789,08	70,55	267,04	1.180,17
					Total [UF/año]	21.257,90

Tabla 11.97: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Nanofiltración según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]				Sub-Total [UF/año]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
PTAP Santa Rosa	594,80	9.505,51	1.011,82	119.198,00	132.942,46	132.942,46
PTAP El Carmelo	470,79	7.592,89	806,88	94.610,37	2.611,99	105.622,13
					Total [UF/año]	238.564,59

Tabla 11.98: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Nanofiltración según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]				Sub-Total [UF/año]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
Alto Hospicio	AH+EB	165,97	2.891,57	303,13	34.172,81	38.467,45
	LT+ST+LN	66,44	1.356,52	138,65	14.438,92	16.540,30
	LP	60,38	1.263,02	128,63	13.237,01	15.204,81
Iquique	CV1	283,53	4.704,77	497,41	57.482,26	64.367,54
	CV2	202,55	3.455,82	363,59	41.426,51	46.527,33
	CV3	177,35	3.067,06	321,93	36.428,78	40.974,15
	LD+H	85,35	1.648,25	169,91	18.189,31	20.707,52
	C+SS	23,28	690,88	67,32	5.881,86	7.032,20
					Total [UF/año]	249.821,30

Tabla 11.99: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Intercambio Iónico según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]				Sub-Total [UF/año]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
PTAP Santa Rosa	594,80	17.102,14	4.958,40	54.827,61	2.829,84	79.717,99
PTAP El Carmelo	470,79	11.375,21	3.316,85	37.084,28	1.912,17	53.688,51
					Total [UF/año]	133.406,50

Tabla 11.100: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Intercambio Iónico según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]				Sub-Total [UF/año]	
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.		
Alto Hospicio	AH+EB	165,97	4.408,30	1.341,54	16.207,35	830,18	22.787,37
	LT+ST+LN	66,44	1.613,68	524,33	7.020,28	356,70	9.515,00
	LP	60,38	1.453,06	475,97	6.446,60	327,27	8.702,89
Iquique	CV1	283,53	7.114,57	2.109,68	24.344,21	1.251,80	34.820,26
	CV2	202,55	4.962,15	1.493,97	17.716,44	908,88	25.081,44
	CV3	177,35	4.298,34	1.303,22	15.644,27	801,76	22.047,60
	LD+H	85,35	1.933,04	615,49	7.997,28	407,27	10.953,09
	C+SS	23,28	488,65	173,69	2.613,67	131,70	3.407,71
					Total [UF/año]	137.315,36	

Tabla 11.101: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]			Sub-Total [UF/año]	
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.		
PTAP Santa Rosa	830,48	888,89	372,86	117,20	279,31	109,06	878,43
PTAP El Carmelo	679,74	700,00	293,63	92,30	219,96	85,88	691,76
					Total [UF/año]	1.570,19	

Tabla 11.102: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]				Sub-Total [UF/año]	
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	I.E.		
Alto Hospicio	AH+EB	235,38	241,67	101,37	31,86	75,94	29,65	238,82
	LT+ST+LN	94,23	97,22	40,78	12,82	30,55	11,93	96,08
	LP	85,63	97,22	40,78	12,82	30,55	11,93	96,08
Iquique	CV1	402,12	444,44	186,43	58,60	139,66	54,53	439,22
	CV2	287,27	319,44	134,00	42,12	100,38	39,19	315,69
	CV3	251,52	255,56	107,20	33,70	80,30	31,35	252,55
	LD+H	121,05	138,89	58,26	18,31	43,64	17,04	137,25
	C+SS	33,02	33,33	13,98	4,40	10,47	4,09	32,94
					Total [UF/año]	1.608,63		

Tabla 11.103: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Sistema Desincrustante Magnético según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]			Sub-Total [UF/año]
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	
PTAP Santa Rosa	830,48	846,88	1.315,27	413,43	1.313,70	3.042,40
PTAP El Carmelo	679,74	681,25	1.054,53	331,47	1.053,27	2.439,27
					Total [UF/año]	5.481,67

Tabla 11.104: Detalle de los CAPEX anualizados, dada la aplicación de Sistema Desincrustante Magnético según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX Anualizados [UF/año]			Sub-Total [UF/año]	
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.		
Alto Hospicio	AH+EB	235,38	268,75	419,50	131,86	419,00	970,35
	LT+ST+LN	94,23	96,88	154,90	48,69	154,71	358,30
	LP	85,63	96,88	154,90	48,69	154,71	358,30
Iquique	CV1	402,12	406,25	631,18	198,40	630,42	1.459,99
	CV2	287,27	303,13	472,42	148,49	471,85	1.092,76
	CV3	251,52	268,75	419,50	131,86	419,00	970,35
	LD+H	121,05	131,25	207,82	65,32	207,57	480,71
	C+SS	33,02	41,67	69,91	21,97	69,82	161,71
					Total [UF/año]	5.852,50	

## 11.28 ANEXO Z; “COSTO TOTAL A LARGO PLAZO TEÓRICO”

En la teoría, y según lo presentado en el Decreto con fuerza de Ley N° 70 (de 1988, del Ministerio de Obras Públicas [88]), en el Artículo 24° de dicho reglamento se define al Costo Total a Largo Plazo (CTLP), como aquel valor anual constante, requerido para cubrir los costos de explotación eficiente y los de inversión de un proyecto de reposición optimizado. En consecuencia, el cálculo del CTLP deberá considerar el diseño de una empresa eficiente que inicia su operación, considerando para ello su trayectoria óptima de crecimiento, realiza las inversiones necesarias para proveer los servicios involucrados e incurre en los gastos de explotación propios del giro de la empresa, obteniendo una recaudación compatible con un valor actualizado neto del proyecto de reposición optimizado igual a cero. Para ello, deberá considerarse la vida útil de los activos, la tasa de tributación vigente y la tasa de costo de capital, cuya forma de cálculo y componentes se presentan en la ecuación (11.38), a continuación.

$$CTLP = \frac{I - \frac{R}{(1+r)^{35}} + \sum_{i=1}^{35} \frac{(G+D) * (1-t) - D}{(1+r)^i}}{(1-t) * \left( \frac{(1+r)^{35} - 1}{(1+r)^{35} * r} \right)} \quad (11.38)$$

- CTPL = Costo Total a Largo Plazo.
- I = Inversión asociada a la reposición optimizada de la empresa en el período cero, más el valor actual de la inversión necesaria para mantener la vida útil del proyecto de reposición hasta finalizar el horizonte de evaluación, actualizado a la tasa de costo de capital.
- G = Gastos anuales de operación y mantenimiento asociados a la reposición de la empresa.
- D = Depreciación anual de las inversiones asociadas a la reposición de la empresa.
- R = Valor residual de la inversión al cabo de n años.
- t = Tasa de impuesto vigente.
- r = Tasa de costo de capital.
- i = Período anual.

A continuación, desarrollando y simplificando la ecuación (11.38) se obtiene la ecuación (11.39) (recordando lo presentado en el apartado 7.4.4, en la ecuación (7.5) referente a la definición del Valor Actual de Costos).

$$CTLP = \frac{I}{f * (1 - t)} - \frac{R}{f * (1 - t) * (1 + r)^{35}} + \sum_{i=1}^{35} \frac{G}{(1 + r)^i} * \frac{1}{f} - \sum_{i=1}^{35} \frac{D}{(1 + r)^i} * \frac{1}{f} * \frac{t}{(1 - t)} \quad (11.39)$$

$$CTLP = \frac{I}{f * (1 - t)} - \frac{R}{f * (1 - t) * (1 + r)^{35}} + VAC_G - VAC_D * \frac{t}{(1 - t)}$$

- $f = \left( \frac{(1+r)^{35}-1}{(1+r)^{35}*r} \right)$
- VAC<sub>G</sub> = Valor Actual de Costos de los gastos anuales de operación y mantenimiento asociados a la reposición de la empresa.
- VAC<sub>D</sub> = Valor Actual de Costos de la depreciación anual de las inversiones asociadas a la reposición de la empresa.

Además, y según el Artículo 36° del mismo reglamento [97], para la obtención de los costos totales a evaluar para determinar la tarifa (abarcando producción y distribución de AP, en conjunto con recolección y disposición de aguas servidas), se debe realizar una corrección al CTLP. Así, se descuenta del valor de reposición de las instalaciones del prestador, aquella parte correspondiente a aportes de terceros, valorizada de acuerdo a su costo de reposición, considerando la anualidad necesaria para renovar dichos aportes. Para estos efectos se debe aplicar la fórmula mostrada por la ecuación (11.40).

$$CTLPN = CTPL - r * \left( \frac{AT - \frac{RAT}{(1+r)^{35}}}{(1-t)} \right) \pm \left( \frac{DAT * t}{(1-t)} \right) \quad (11.40)$$

- CTLPN = Costo Total de Largo Plazo Neto de aportes de terceros.
- CTLP = Costo Total de Largo Plazo, calculado según la ecuación (11.39).
- AT = Valor de la inversión aportada por terceros.
- t = Tasa de impuesto vigente.
- r = Tasa de costo de capital.
- RAT = Valor residual de la inversión aportada por terceros.
- DAT = Depreciación de la inversión aportada por terceros, como anualidad, equivalente a un VAC.

Así, desarrollando, simplificando y reordenando, el CTLPN queda como muestra la ecuación (11.41).

$$CTLPN = \frac{I}{f * (1-t)} - \frac{R}{f * (1-t) * (1+r)^{35}} - r * \left( \frac{AT - \frac{RAT}{(1+r)^{35}}}{(1-t)} \right) - (VAC_D - DAT) * \frac{t}{(1-t)} + VAC_G \quad (11.41)$$

Analizando la ecuación anterior, y dados los alcances del presente estudio, se observa que el CTLPN tiene una componente asociada al VAC de las inversiones, y otro al VAC de las operaciones, por lo que para efectos de estimar los costos de los tratamientos “r”, para luego obtener un valor de tarifa asociado únicamente a su implementación, es que se utiliza la aproximación presentada a continuación por la ecuación (11.42).

$$CTLPN_r \approx VAC_{C.I.r} + VAC_{C.O.r} \approx (CAPEX + OPEX)_{Anualidad} \quad (11.42)$$

Cabe mencionar, que dicha aproximación, se utiliza tanto para la determinación de los CTLPN Reales, asociados a las vidas útiles técnicas y la operación de los tratamientos durante 15 años del horizonte de diseño, como también para los CTLPN de la Empresa Modelo, asociados a la operación de los tratamientos durante los 5 años del período de vigencia de las tarifas.

## 11.29 ANEXO AA; “CAPEX DE EMPRESA MODELO”

Tabla 11.105: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Precipitación con Cal por una “Empresa Modelo”, según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	Sub-Total +20% [UF]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.		
PTAP Santa Rosa	351,18	38.409,43	4.400,23	15.447,52	1.977,56	60.234,73	72.281,68
PTAP El Carmelo	317,08	35.389,82	4.027,02	14.086,26	1.821,02	55.324,12	66.388,94
						Total [UF]	138.670,62

Tabla 11.106: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Precipitación con Cal por una “Empresa Modelo”, según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	Sub-Total +20% [UF]	
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.			
AH	AH+EB	97,99	15.988,42	1.629,09	5.340,02	815,25	23.772,78	28.527,33
	LT+ST+LN	39,23	10.784,62	985,92	2.994,12	545,48	15.310,15	18.372,18
	LP	35,65	10.467,68	946,75	2.851,25	529,05	14.794,73	17.753,68
IQQ	CV1	182,02	23.430,18	2.548,86	8.694,80	1.201,03	35.874,88	43.049,85
	CV2	130,04	18.826,42	1.979,85	6.619,40	962,37	28.388,04	34.065,65
	CV3	113,85	17.393,39	1.802,74	5.973,39	888,08	26.057,59	31.269,11
	LD+H	54,80	12.163,47	1.156,34	3.615,72	616,96	17.552,49	21.062,99
	C+SS	14,95	8.634,47	720,18	2.024,83	434,02	11.813,50	14.176,19
						Total [UF]	208.276,99	

Tabla 11.107: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Nanofiltración por una “Empresa Modelo”, según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.		
PTAP Santa Rosa	351,18	81.928,93	8.407,44	497.931,20	21.385,62	609.653,18	
PTAP El Carmelo	317,08	74.433,01	7.629,75	450.446,34	19.593,69	552.102,79	
						Total [UF]	1.161.755,98

Tabla 11.108: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Nanofiltración por una “Empresa Modelo”, según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.		
Alto Hospicio	AH+EB	97,99	26.270,73	2.633,00	145.349,95	8.080,36	182.334,04
	LT+ST+LN	39,23	13.352,76	1.292,78	63.517,73	4.992,28	83.155,56
	LP	35,65	12.565,98	1.211,15	58.533,66	4.804,20	77.115,00
Iquique	CV1	182,02	44.744,26	4.549,59	262.375,28	12.496,51	324.165,64
	CV2	130,04	33.315,81	3.363,91	189.978,82	9.764,51	236.423,05
	CV3	113,85	29.758,44	2.994,84	167.443,74	8.914,11	209.111,13
	LD+H	54,80	16.775,63	1.647,89	85.200,75	5.810,53	109.434,81
	C+SS	14,95	8.015,21	739,02	29.705,60	3.716,33	42.176,15
						Total [UF]	1.263.915,36

Tabla 11.109: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Intercambio Iónico por una “Empresa Modelo”, según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.	
PTAP Santa Rosa	351,18	183.933,54	52.393,49	457.341,03	23.546,75	717.214,81
PTAP El Carmelo	317,08	103.277,23	29.525,16	259.470,04	13.351,29	405.623,72
					Total [UF]	1.122.838,53

Tabla 11.110: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Intercambio Iónico por una “Empresa Modelo”, según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	
		O.C.	T.A.	E.E.	I.E.		
Alto Hospicio	AH+EB	97,99	45.917,96	14.008,28	137.481,79	7.010,19	204.418,22
	LT+ST+LN	39,23	16.701,39	5.499,54	60.157,21	3.042,73	85.400,88
	LP	35,65	15.061,49	5.001,14	55.294,71	2.794,68	78.152,01
Iquique	CV1	182,02	68.819,07	20.174,13	185.449,13	9.506,11	283.948,44
	CV2	130,04	47.696,38	14.265,92	135.654,54	6.934,40	204.551,24
	CV3	113,85	41.225,45	12.441,63	120.040,82	6.129,12	179.837,02
	LD+H	54,80	18.465,57	5.905,48	62.119,23	3.150,85	89.641,13
	C+SS	14,95	4.932,81	1.754,46	21.034,98	1.057,34	28.779,60
					Total [UF]	1.154.728,54	

Tabla 11.111: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico por una “Empresa Modelo”, según un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	I.E.	
PTAP Santa Rosa	490,32	500,00	2.989,42	909,82	1.949,62	649,87	6.498,74
PTAP El Carmelo	457,81	458,33	2.740,30	834,00	1.787,15	595,72	5.957,18
					Total [UF]	12.455,92	

Tabla 11.112: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Sistema Antical Electrónico por una “Empresa Modelo”, según un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX [UF]				Sub-Total [UF]	
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	I.E.		
Alto Hospicio	AH+EB	138,97	147,22	880,22	267,89	574,06	191,35	1.913,52
	LT+ST+LN	55,63	66,67	398,59	121,31	259,95	86,65	866,50
	LP	50,56	52,78	315,55	96,04	205,79	68,60	685,98
Iquique	CV1	258,16	272,22	1.627,57	495,35	1.061,46	353,82	3.538,20
	CV2	184,42	194,44	1.162,55	353,82	758,19	252,73	2.527,29
	CV3	161,47	172,22	1.029,69	313,38	671,54	223,85	2.238,45
	LD+H	77,71	83,33	498,24	151,64	324,94	108,31	1.083,12
	C+SS	21,20	27,78	166,08	50,55	108,31	36,10	361,04
					Total [UF]	13.214,10		

Tabla 11.113: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Sistema Desincr. Magnético por una “Empresa Modelo”, para un TC.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX [UF]			Sub-Total [UF]
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.	
PTAP Santa Rosa	490,32	495,00	10.943,78	3.330,71	9.516,33	23.790,82
PTAP El Carmelo	457,81	465,00	10.285,50	3.130,37	8.943,91	22.359,77
Total [UF]						46.150,59

Tabla 11.114: Detalle de los CAPEX, dada la aplicación de Sistema Desincrustante Magnético por una “Empresa Modelo”, para un TD.

Punto a Tratar	Q Diseño [l/s]	C.T.T. [l/s]	CAPEX [UF]			Sub-Total [UF]	
			O.C.	T.A.	C.E. + C.Ins.		
Alto Hospicio	AH+EB	138,97	150,00	3.373,55	1.026,73	2.933,52	7.333,80
	LT+ST+LN	55,63	62,50	1.453,56	442,39	1.263,97	3.159,92
	LP	50,56	62,50	1.453,56	442,39	1.263,97	3.159,92
Iquique	CV1	258,16	270,00	6.006,67	1.828,12	5.223,19	13.057,98
	CV2	184,42	195,00	4.360,97	1.327,25	3.792,15	9.480,37
	CV3	161,47	165,00	3.702,69	1.126,91	3.219,73	8.049,32
	LD+H	77,71	90,00	2.056,99	626,04	1.788,68	4.471,71
	C+SS	21,20	25,00	630,71	191,96	548,45	1.371,11
Total [UF]						50.084,14	

### 11.30 ANEXO AB; “OPEX DE EMPRESA MODELO”

Tabla 11.115: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de P. con Cal por una “Empresa Modelo”, para un TC.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por PTAP – T. Centralizado					
		Santa Rosa			El Carmelo		
		OPEX C. [UF]	OPEX Q. [UF]	OPEX L. [UF]	OPEX C. [UF]	OPEX Q. [UF]	OPEX L. [UF]
0	2017	69.408,17	59.806,22	5.787,92	67.670,31	55.346,05	5.540,25
1	2018	70.291,81	61.112,73	5.913,85	68.198,83	56.101,09	5.615,57
2	2019	71.200,53	62.456,20	6.043,35	68.724,70	56.852,23	5.690,51
3	2020	72.247,40	64.004,05	6.192,55	69.356,42	57.754,78	5.780,54
4	2021	73.078,50	65.232,28	6.310,99	69.762,57	58.334,28	5.838,42
5	2022	74.048,64	66.666,20	6.449,25	70.273,02	59.062,99	5.911,17

Tabla 11.116: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de P. con Cal por una “Empresa Modelo”, para un TD.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por Localidad – T. Disperso					
		Alto Hospicio			Iquique		
		OPEX C. [UF]	OPEX Q. [UF]	OPEX L. [UF]	OPEX C. [UF]	OPEX Q. [UF]	OPEX L. [UF]
0	2017	107.697,83	29.438,68	3.037,34	203.478,09	85.782,87	8.479,94
1	2018	108.148,93	30.081,80	3.101,62	204.439,15	87.194,64	8.616,91
2	2019	108.612,78	30.743,10	3.167,73	205.409,89	88.620,62	8.755,25
3	2020	109.147,20	31.505,00	3.243,89	206.554,06	90.301,36	8.918,31
4	2021	109.571,27	32.109,58	3.304,33	207.367,24	91.495,88	9.034,20
5	2022	110.066,35	32.815,40	3.374,88	208.352,74	92.943,56	9.174,65

Tabla 11.117: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Nanofiltración por una “Empresa Modelo”, para un TC.

		Costos de Operación por PTAP – T. Centralizado					
Año	Año de estudio	Santa Rosa			El Carmelo		
		OPEX E.	OPEX Q.	O. OPEX	OPEX E.	OPEX Q.	O. OPEX
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	16.679,50	17.485,10	17.082,30	15.479,70	16.184,69	15.832,19
1	2018	17.030,95	17.866,03	17.448,49	15.682,80	16.404,83	16.043,82
2	2019	17.392,35	18.257,73	17.825,04	15.884,86	16.623,83	16.254,35
3	2020	17.761,68	18.658,04	18.209,86	16.085,20	16.840,97	16.463,09
4	2021	18.139,12	19.067,13	18.603,12	16.283,54	17.055,94	16.669,74
5	2022	18.524,85	19.485,20	19.005,02	16.479,56	17.268,40	16.873,98

Tabla 11.118: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Nanofiltración por una “Empresa Modelo”, para un TD.

		Costos de Operación por Localidad – T. Disperso					
Año	Año de estudio	Alto Hospicio			Iquique		
		OPEX E.	OPEX Q.	O. OPEX	OPEX E.	OPEX Q.	O. OPEX
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	9.693,44	8.727,01	9.210,22	26.033,09	25.250,66	25.641,87
1	2018	9.866,44	8.914,51	9.390,48	26.412,86	25.662,28	26.037,57
2	2019	10.044,33	9.107,32	9.575,83	26.796,45	26.078,04	26.437,25
3	2020	10.226,13	9.304,37	9.765,25	27.182,20	26.496,14	26.839,17
4	2021	10.411,92	9.505,74	9.958,83	27.569,91	26.916,35	27.243,13
5	2022	10.601,79	9.711,53	10.156,66	27.959,33	27.338,44	27.648,89

Tabla 11.119: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Int. Iónico por una “Empresa Modelo”, para un TC.

		Costos de Operación por PTAP - "Alternativa 1"					
Año	Año de estudio	Santa Rosa			El Carmelo		
		OPEX E.C.	OPEX L.	OPEX O.	OPEX E.C.	OPEX L.	OPEX O.
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	149.438,95	886,59	46.648,04	133.172,12	822,82	41.580,44
1	2018	152.695,03	905,27	47.664,25	135.155,60	833,62	42.199,29
2	2019	156.041,24	924,48	48.708,58	137.139,11	844,36	42.818,13
3	2020	159.859,08	946,61	49.900,18	139.476,80	857,26	43.547,55
4	2021	162.955,02	964,17	50.866,34	141.088,06	865,55	44.050,12
5	2022	166.525,83	984,67	51.980,77	143.049,06	875,96	44.661,88

Tabla 11.120: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de Int. Iónico por una “Empresa Modelo”, para un TD.

		Costos de Operación por Localidad – T. Disperso					
Año	Año de estudio	Alto Hospicio			Iquique		
		OPEX E.C.	OPEX L.	OPEX O.	OPEX E.C.	OPEX L.	OPEX O.
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	73.559,00	452,41	22.966,74	209.132,81	1.257,99	65.287,10
1	2018	75.161,76	461,61	23.466,95	212.754,81	1.278,17	66.417,32
2	2019	76.808,88	471,06	23.981,01	216.421,22	1.298,56	67.561,39
3	2020	78.688,15	481,96	24.567,55	220.680,34	1.322,59	68.890,51
4	2021	80.212,08	490,60	25.043,13	223.844,58	1.339,67	69.877,71
5	2022	81.969,76	500,69	25.591,69	227.598,62	1.360,37	71.049,06

Tabla 11.121: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de S.A. Electrónico por una “Empresa Modelo”, para un TC.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por PTAP – T. Centralizado			
		Santa Rosa		El Carmelo	
		OPEX Snt.	OPEX E.	OPEX Snt.	OPEX E.
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	27.605,52	0,28	26.914,33	0,28
1	2018	27.956,97	0,28	27.124,53	0,28
2	2019	28.318,39	0,28	27.333,69	0,28
3	2020	28.734,76	0,28	27.584,94	0,28
4	2021	29.065,31	0,28	27.746,48	0,28
5	2022	29.451,16	0,28	27.949,50	0,28

Tabla 11.122: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de S. A. Electrónico por una “Empresa Modelo”, para un TD.

Año	Año de estudio	Costos de Operación por Localidad – T. Disperso			
		Alto Hospicio		Iquique	
		OPEX Snt.	OPEX E.	OPEX Snt.	OPEX E.
		[UF]	[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	42.834,36	0,48	80.928,79	0,83
1	2018	43.013,78	0,48	81.311,03	0,83
2	2019	43.198,27	0,48	81.697,12	0,83
3	2020	43.410,82	0,48	82.152,18	0,83
4	2021	43.579,48	0,48	82.475,61	0,83
5	2022	43.776,39	0,48	82.867,57	0,83

Tabla 11.123: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de S. D. Magnético por una “Empresa Modelo”, para un TC.

Año	Año de estudio	OPEX - T. Centralizado		OPEX TOTAL Sistema IQQ-AH
		PTAP Santa Rosa	PTAP El Carmelo	
		[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	27.605,52	26.914,33	54.519,85
1	2018	27.956,97	27.124,53	55.081,50
2	2019	28.318,39	27.333,69	55.652,08
3	2020	28.734,76	27.584,94	56.319,70
4	2021	29.065,31	27.746,48	56.811,79
5	2022	29.451,16	27.949,50	57.400,66

Tabla 11.124: Resumen de los OPEX, según tipo, dada la aplicación de S. D. Magnético por una “Empresa Modelo”, para un TD.

Año	Año de estudio	OPEX – T. Disperso		OPEX TOTAL Sistema IQQ-AH
		Alto Hospicio	Iquique	
		[UF]	[UF]	[UF]
0	2017	42.834,36	80.928,79	123.763,15
1	2018	43.013,78	81.311,03	124.324,80
2	2019	43.198,27	81.697,12	124.895,38
3	2020	43.410,82	82.152,18	125.563,00
4	2021	43.579,48	82.475,61	126.055,09
5	2022	43.776,39	82.867,57	126.643,96

### 11.31 ANEXO AC; “DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA ANUAL ACTUALIZADA Q\*”

La presente sección muestra la forma en que se determina la Demanda Anual Actualizada Q\*, según el Decreto con fuerza de Ley N° 70, de 1988, del Ministerio de Obras Públicas [88], el cual es el Reglamento que muestra el procedimiento administrativo para la determinación de fórmulas tarifarias. Así, en la letra (i) del Artículo 35° de dicho reglamento, se define la fórmula de cálculo del Q\*, presentada de forma genérica por la ecuación (11.43), a continuación.

$$Q^* = \left( \sum_{i=1}^5 \frac{Q_i}{(1+t)^i} \right) * \left( \frac{(1+t)^5 * t}{(1+t)^5 - 1} \right) \quad (11.43)$$

- Q\* = Demanda anual actualizada o equivalente, que corresponde a una demanda promedio según la proyección de facturación dentro de un período y localidad particular, que en este caso son 5 años, dada la duración de la tarifa. Además, se asume que dicha demanda se mantiene constante dentro del horizonte de evaluación de 35 años, para la estimación tarifaria de la “Empresa Modelo”, tal y como se realiza para los estudios tarifarios de la SISS [85].
- Q<sub>i</sub> = Demanda período “i”, que corresponde al volumen facturado proyectado, de cada caso.
- t = tasa de costo de capital, tasa de interés o de retorno, del 7% tal y como se menciona anteriormente.

Tal y como se menciona por reglamento, para el concepto de “Empresa Modelo”, particularmente, en el ejercicio de valorización de los proyectos de plantas de tratamiento presentados, se supone que la empresa enfrenta un escenario en que la demanda de consumo es conocida y constante durante el horizonte de evaluación de 35 años, lo que implica que muchas de las actividades realizadas por la empresa en la realidad, deben ser consideradas sólo en el inicio en la empresa modelo; bajo el concepto de puesta en marcha [85].

Como particularidad, y para simplificar el análisis, el Q\* se calcula con la proyección de las facturaciones medias anuales en miles de metros cúbicos, durante los primeros 5 años de estudio según los datos de caudales medios de consumo, ya determinados, a los que se les calcula su equivalencia en miles de metros cúbicos [Mm<sup>3</sup>], y que se muestran en la *Tabla 11.125*.

Tabla 11.125: Proyección de la facturación anual media, para cada una de las localidades en estudio.

Año	Año de estudio	Facturación Anual Media		
		Alto Hospicio	Iquique	Total
		[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]	[Mm <sup>3</sup> ]
0	2017	5.370,03	15.186,77	20.556,80
1	2018	5.487,35	15.436,70	20.924,05
2	2019	5.607,98	15.689,16	21.297,13
3	2020	5.746,96	15.986,71	21.733,67
4	2021	5.857,24	16.198,18	22.055,43
5	2022	5.985,99	16.454,48	22.440,47

### 11.32 ANEXO AD; “TASA INTERNA DE RETORNO”

Otra forma de analizar los costos asumidos por la empresa sanitaria es mediante una estimación de las rentabilidades de las inversiones a realizar, es decir, si es viable para la sanitaria invertir en la implementación de cada tratamiento en estudio, respectivamente.

Así, se utiliza el factor de Tasa Interna de Retorno (TIR) [98], que representa la rentabilidad de una inversión en el tiempo, según la ecuación (11.44) y que determina la rentabilidad de los cobros y pagos actualizados generados por dicha inversión, según las siguientes consideraciones particulares al presente estudio:

- Los gastos de inversión y operación anual, son los relativos a la estimación real de costos de una empresa sanitaria, según la implementación del tratamiento “r” en estudio.
- Los ingresos por tarifa, son aquellos correspondientes a la estimación de costos de una empresa modelo, según el aumento tarifario dada la implementación del tratamiento “r”.
- Se consideran 15 años de horizonte de diseño, en los cuales se asume una tarifa constante.

$$VAN_r = 0 = -I_0 + \left( \sum_{i=1}^{15} \frac{F_i}{(1+TIR_r)^i} \right) \quad (11.44)$$

- $I_0$  = Inversión inicial, realizada durante el “año 0”.
- $F_i$  = Flujo de dinero durante el año “i”, representado como la suma de los egresos por inversión u operación (en negativo), y los ingresos por tarifa (en positivo) de dicho año.
- $VAN_r$  = Valor Actualizado Neto del tratamiento “r”, que representa el valor presente de un determinado número de flujos de dinero futuros, originados por la inversión inicial.
- $TIR_r$  = Tasa Interna de Retorno del tratamiento “r”, definido como el valor de la tasa de descuento que hace que el  $VAN_r$ , sea igual a cero, para un proyecto de inversión dado.

La TIR se utiliza como criterio de selección de proyectos, al compararla con la tasa de descuento “t” de los flujos, elegida para el cálculo de los VAN, siendo 7% (tasa mínima de rentabilidad exigida a la inversión) para el estudio. Así, el criterio de selección queda como sigue:

- Si  $TIR > 7\%$ , el proyecto es rentable y será aceptado.
- Si  $TIR = 0$ , el proyecto es irrelevante, pudiendo llevarse a cabo si su ejecución mejora la posición competitiva de la empresa y no hay alternativas más favorables.
- Si  $TIR < 7\%$ , el proyecto no es rentable y será rechazado.

Finalmente, se determinan los flujos de dinero, para cada tratamiento y alternativa de aplicación, pudiendo calcular la TIR respectiva a cada uno, tal y como se muestra en la Tabla 11.126.

Tabla 11.126: TIR de cada tratamiento. En rojo las tasas negativas, en naranja las tasas positivas y no rentables, y en verde las rentables.

Tipo Tratamiento	TIR [%]	
	T. Centralizado	T. Disperso
Precipitación con Cal	-13,94%	-10,30%
Nanofiltración	-14,48%	-12,67%
Intercambio Iónico	-25,51%	-21,52%
Sistema Antical Electrónico	8,76%	20,09%
Sistema Desincrustante Magnético	2,07%	9,30%

Se observa que aquellos proyectos que no son rentables necesitan más años de operación para recuperar la inversión.

Ahora bien, cambiando el análisis desde el punto de vista de las empresas sanitarias que asumirán los costos y buscan invertir en proyectos rentables, los distintos valores de TIR, mostrados por la *Tabla 11.126*, dan a entender que solo los sistemas innovadores son rentables para los 15 años del horizonte de diseño, siendo el S.A.E aplicado de manera dispersa, la más rentable con un TIR del 20,09%.

### 11.33 ANEXO AE; “IMAGEN LÍNEA DE AGUA POTABLE”



Imagen 11.3: Línea de agua potable, en donde se encuentra la llave de paso para alimentación del sector de oficinas.

### 11.34 ANEXO AF; “RESULTADOS DE PRUEBAS Y PROCEDIMIENTOS ADICIONALES”

#### 11.34.1 Limpieza preliminar de hervidores

Durante la semana 6 de la prueba, se realiza una limpieza los 4 hervidores (hervidor controlado y de uso libre de ambas líneas), con el fin de eliminar los efectos de la desincrustación inicial.

De esta forma, se eliminaron las incrustaciones en la línea tratada con el sistema desincrustante.

#### 11.34.2 Reporte de hervidor antiguo

Previo a la instalación del sistema del AIV, se utilizaba frecuentemente un hervidor de agua, el cual se encontraba claramente incrustado (denominado “Hervidor Antiguo”).

Así, la prueba consistió en reutilizar el hervidor antiguo 2 veces al día (durante 15 días efectivos), y registrar lo ocurrido mediante fotografías, observando que:

- Con el tiempo, se fueron formando costras que se descascaran solas, y los restos incrustados son fácilmente removidos con los dedos, sin mucho esfuerzo, ya que las incrustaciones estaban más blandas.
- Luego de 3 semanas se mantiene estable, se retira la gran mayoría de la incrustación con agua y la fuerza de los dedos, y solo es necesaria la utilización de una mínima cantidad de ácido cítrico para retirar el sarro incrustado, que nunca había sido removido.

#### **11.34.3 Avance parcial de desincrustación en grifería del sector de tratamiento**

Se realiza una comparación de imágenes, con respecto al estado inicial (al momento de la instalación del AIV) de la grifería del comedor del laboratorio, y su estado transcurridos 2 meses de prueba, determinando una disminución parcial de las incrustaciones exteriores de las griferías.

#### **11.34.4 Residuos del hervidor del laboratorio**

Se realiza un estudio de la consistencia del concho depositado del hervidor controlado del comedor del laboratorio. Cabe señalar que, por las características de la prueba, se dejaron 500 [ml] cada vez que se hervía el agua, para aumentar la concentración del sarro en su nueva forma (aragonita en vez de calcita). Así, de dichos 500 [ml] acumulados, se extrajeron 200 [ml] para esta experiencia, durante la cual se observa que:

- El residuo se mantiene depositado en el fondo y adherido a las paredes del hervidor controlado, sin embargo, es de fácil remoción.
- Durante la experiencia, el residuo se re-suspende con mucha facilidad y el agua se ve "como con polvo blanco", no agradable a la vista.

Cabe mencionar que, luego de la experiencia, el agua y los residuos son devueltos al hervidor controlado.

#### **11.34.5 Limpieza de grifería**

Durante el día 46 de la prueba, se realiza una limpieza simple de la grifería de ambas líneas, utilizando agua, y una esponja de lava platos con lavaloz, obteniendo los siguientes comentarios:

- Muchas de las manchas presentes en ambas griferías, son producto de la evaporación de gotas de agua, donde su remoción es más fácil en la grifería del laboratorio, que posee agua tratada con el acelerador iónico.
- No se realiza la limpieza con otros productos o materiales (como virutilla), para que fuera lo más simple posible, evitando además la utilización excesiva de fuerza para ambas limpiezas.

- Ambas griferías quedaron con incrustaciones, que necesitan de ácido cítrico u otro, para poder ser removidas. Sin embargo, la grifería del sector sin tratamiento queda con mayores incrustaciones luego de la limpieza.
- Cabe mencionar que ambas griferías son de distinto modelo y forma, y también que tienen distintas condiciones iniciales de incrustación, por lo que se recomienda realizar una prueba más homogénea para obtener resultados más concluyentes.

#### **11.34.6 Test de hervidores**

Durante las 2 primeras semanas de prueba, se fotografían diariamente los hervidores controlados de ambas líneas, para tener una noción del avance de la incrustación inicial.

#### **11.34.7 Limpieza de hervidores**

El día 66 de prueba, se realiza una limpieza simple (utilizando un detergente lavalozas y una esponja de lava platos, y evitando el uso excesivo de fuerza) de los hervidores no controlados y de uso libre, de ambas líneas.

Finalmente, se observa claramente la diferencia en la condición final de cada hervidor, donde el hervidor con agua tratada queda en mejores condiciones luego de una limpieza simple.

#### **11.34.8 Test de Espuma**

Su fin es verificar a grandes rasgos, el aumento en la generación de espuma tanto en un vaso con detergente como en una esponja de lava platos, debido al uso de agua tratada con el AIV, determinando que:

- No se observa una diferencia importante entre ambos resultados, tanto en los vasos como en esponjas
- Se recomienda realizar una prueba con más parámetros y con condiciones más controladas que las mencionadas en este test, de características simples. Por ejemplo, agregar a la prueba otros detergentes utilizados en el hogar, como los detergentes de ropa o los jabones, y así verificar el cambio en su eficiencia según el agua que se utilice (tratada o no).
- También se podría verificar la duración de la espuma generada.

#### **11.34.9 Test de sabor**

Con el fin de determinar alguna diferencia significativa en cuanto al sabor del agua tratada, con respecto a la no tratada, se realiza una prueba que consistió en preguntarles a 6 personas, acerca de su percepción sensorial al probar agua tratada y no tratada con el AIV, sin que ellos distinguieran el origen del agua que estaban probando, para finalmente registrar y analizar sus respuestas, obteniendo finalmente que:

- Si bien se observa una preferencia por el agua tratada (50% de preferencia y 50% de indiferencia), la indiferencia muestra que para algunas personas no es tan llamativo el cambio perceptual en el sabor, posiblemente debido a la característica personal en cuanto

al gusto adquirido del sabor del agua que cada participante espera o se acostumbra a tomar. Sin embargo, al no existir preferencia contundente sobre al agua sin tratar, sugiere un buen antecedente en cuanto a la aprobación del uso del acelerador iónico para líneas de agua potable del hogar, y su efecto en el sabor del agua.

- Para obtener resultados más concluyentes, se debería ampliar el espectro utilizado, tanto de participantes, como de tipo de agua tratada, ya que las características propias de las aguas de origen darán distintos y variados sabores al agua de la llave, incluso en algunos casos independientes de las concentraciones de dureza.

#### **11.34.10 Índice de Langelier (IL)**

Sabiendo que dicho índice hace referencia al equilibrio químico del agua, mostrando su carácter corrosivo o incrustante. Así, durante la treceava semana de la prueba se tomaron muestras de agua de ambas líneas en cuestión, y se analizaron en el laboratorio para obtener los parámetros necesarios, y así calcular el índice de Langelier del agua potable, con y sin tratamiento, respectivamente, obteniendo que:

- Los gráficos muestran una variación diaria importante en los valores del IL obtenidos, independiente de la línea de agua en análisis, dando a entender que el agua potable de la zona posee una alta variabilidad en cuanto a los parámetros que componen el índice. Para un mejor análisis, se recomienda realizar la prueba por más días.
- Si bien los índices dan valores de aguas incrustantes (siempre mayores a cero), como lo era de esperar por la importante dureza de las aguas analizadas, estas escapan del rango de aceptabilidad en cuanto a un agua relativamente balanceada, siendo en todo momento, independiente de la ecuación utilizada, en promedio mayores que 0,3.
- Se observa que, durante los 2 primeros días de tomas de muestras, el IL es mayor para la línea con tratamiento, y que solo el último y tercer día fue menor que el IL para la línea sin tratar (independiente de la ecuación utilizada), lo cual contradice lo observado en cuanto al potencial desincrustante del agua tratada. Sin embargo, se recomienda realizar un análisis por mayor tiempo, para obtener resultados más concluyentes, dada la variabilidad de los parámetros mencionados.

#### **11.34.11 Conductividad eléctrica**

Aprovechando la toma de muestras realizada para el Índice de Langelier y la disponibilidad del laboratorio, se analiza la conductividad del agua de cada línea durante dicha semana, arrojando los siguientes resultados:

- No existe una diferencia significativa de la conductividad entre cada línea de agua, salvo que para la línea de oficinas (sin tratamiento) resultó, en todos los casos, un poco mayor que para la línea del laboratorio, posiblemente debido a la ionización del agua tratada. Por otra parte, queda demostrado nuevamente la variabilidad de los parámetros en el tiempo.

- En muchos casos, la conductividad está directamente vinculada a la cantidad de sólidos totales disueltos, es por esto que para el agua potable se espera que esté en un rango de 50 a 500 [uS/cm] (por ejemplo, se esperan 50000 [uS/cm] si fuera agua de mar). Sin embargo, y por las características propias de las aguas extraídas de las napas de suelos nortinos, altamente mineralizadas, la conductividad es mucho mayor a lo esperado, lo cual en ningún caso supone algún tipo de problema, para la salud o para la industria sanitaria.

### **11.35 ANEXO AG; “INFORME FINAL PRUEBA PILOTO ACELERADOR IÓNICO”**

Este Informe, de nombre “Informe Final Prueba Piloto Acelerador Iónico – Iquique (Laboratorio Campos de Deportes)” con fecha del 8 de enero del 2019, se adjunta a la presente memoria, como un archivo adicional en formato PDF, de nombre “ANEXO\_AG;\_Informe\_Final\_Prueba\_Piloto\_Acelerador\_Iónico.pdf”.