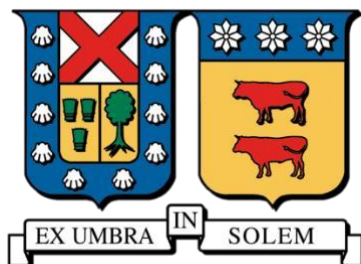


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y MATERIALES  
SANTIAGO-CHILE



ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL DE  
PLANTA DESALINIZADORA POR OSMOSIS  
INVERSA MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL CICLO  
DE VIDA

Presentado por

JUAN JOSÉ PARDO LILLO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE **INGENIERO CIVIL**  
**DE MINAS**

Profesor guía

Msc. CARLOS HUNT

Profesor co-guía

PhD DOUGLAS

AITKEN

Miembro de la Comisión

SANTIAGO, DICIEMBRE 2021

## Resumen Ejecutivo

Para enfrentar los desafíos asociados a la escasez del recurso hídrico, la desalinización de agua de mar ha cobrado fuerza y se visualiza como la alternativa más conveniente para el desarrollo y seguridad hídrica futura del rubro minero. Este proceso elimina las sales disueltas del agua y produce así agua dulce. A pesar de esto, también genera controversias debido al impacto ambiental que trae consigo, principalmente debido al alto consumo energético necesario.

Es por esto por lo que el presente trabajo consiste en la evaluación del impacto ambiental generado por un modelo de la planta desalinizadora de Minera Candelaria ubicada en la tercera región de Atacama. Dentro de los principales objetivos del estudio se encuentran el evaluar diferentes destinos para el uso del agua proveniente de la planta desalinizadora (swap vs no swap) y comparar el desempeño ambiental de la planta alimentada mediante diversas fuentes energéticas, para esto se conforman diversos escenarios. El escenario 1 representa la operación entre 2013 y 2020, los demás escenarios considerarán una extensión hasta el año 2050. El escenario 2 considera una proyección de la matriz 2020, el escenario 3 considera un mix 70% solar-30% convencional 2020, el escenario 4 considera un mix 80% solar-20% convencional 2020, el escenario 5 considera un mix 80% solar-20% eólico y el escenario 6 considera una proyección energética realizada por el Ministerio de Energía.

Para llevar a cabo todo lo mencionado anteriormente se utiliza la metodología del análisis del ciclo de vida, una metodología objetiva y normada por la serie de Normas ISO 1400. Como complemento a esta, es necesaria la información sobre la generación bruta nacional de electricidad y la simulación de los escenarios propuestos en el software Openlca.

A partir de lo mencionado anteriormente, se obtiene que el aporte al cambio climático de cada etapa dentro de la desalinización queda constituida por la construcción con un 5%, captación un 18%, el pretratamiento un 5%, la osmosis inversa un 34 %, el transporte del agua desalinizada un 38% y el impacto del tanque de almacenamiento es casi insignificante. Por otra parte, al comparar los casos de distribución del agua desalinizada swap vs no swap para cualquiera de los escenarios, se concluye que con el modelo swap se obtiene una disminución en los impactos para todas las categorías de impacto con una diferencia porcentual entre ellos que varía entre un 1-7%.

El escenario que resulta con menores impactos es el 6, y para el 2050 el generar 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada tendrá un impacto al cambio climático de 1.70 kg de CO<sub>2</sub>-Eq lo cual equivale a un 35% de lo que se produjo en 2020. Con respecto a los mix energéticos, el que tiene un menor impacto es el de 80% solar-20% eólica, logrando que desalinizar 1 m<sup>3</sup> genere tan solo 1.05 kg de CO<sub>2</sub>-Eq lo cual es un 80% menor de lo que se ha generado realmente desde la puesta en marcha de la planta.

Por todo esto, se puede concluir que los impactos disminuyen debido a la disminución en la energía en base a carbón y el aumento de energías renovables como la solar o eólica.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

**Índice:**

<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 <i>Objetivo general</i> .....	3
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	3
<b>2 ANTECEDENTES .....</b>	<b>4</b>
2.1 CONSUMO TOTAL DE AGUA .....	4
2.1.1 <i>Nacional</i> .....	4
2.1.2 <i>Tercera Región de Atacama</i> .....	4
2.2 FUENTES DE AGUA EN MINERÍA .....	5
2.3 AGUA DE MAR Y DESALINIZACIÓN.....	7
2.4 OSMOSIS INVERSA .....	10
2.5 IMPACTOS DE LA DESALINIZACIÓN .....	12
2.5.1 <i>Alto consumo energético</i> .....	12
2.5.2 <i>Producción y eliminación de salmuera</i> .....	14
2.5.3 <i>Eliminación de productos químicos</i> .....	14
2.5.4 <i>Ruido</i> .....	15
2.5.5 <i>Estudios previos sobre evaluación de impactos ambientales</i> .....	15
2.6 FUENTES DE ENERGÍA.....	16
2.6.1 <i>Sistemas eléctricos en el territorio nacional</i> .....	16
2.6.2 <i>Energías renovables no convencionales</i> .....	17
2.6.2.1 <i>Energía solar</i> .....	17
2.6.2.2 <i>Energía eólica</i> .....	17
2.6.2.3 <i>Energía Hidráulica</i> .....	18
2.7 ENERGÍAS RENOVABLES EN PLANTAS DESALINIZADORAS .....	18
<b>3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (ACV).....</b>	<b>19</b>
3.1 ORIGEN.....	19
3.2 DEFINICIÓN DEL ACV .....	19
3.3 ETAPAS DEL ACV.....	20
3.3.1 <i>Definición del objetivo y el alcance</i> .....	20
3.3.2 <i>Análisis del inventario del ciclo de vida</i> .....	21
3.3.3 <i>Evaluación de impactos</i> .....	22
3.3.3.1 <i>Selección de categorías de impacto</i> .....	24

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

3.3.3.2	Selección de indicadores de impacto .....	26
3.3.3.3	Caracterización .....	27
3.3.4	<i>Interpretación de resultados</i> .....	27
3.4	SOFTWARE PARA EL ACV .....	28
3.4.1	<i>OpenLCA</i> .....	28
3.5	BASE DE DATOS PARA EL ACV.....	29
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>30</b>
4.1	MODELO DE PLANTA DESALINIZADORA.....	30
4.2	ESCENARIOS .....	31
4.2.1	<i>Definición de escenarios</i> .....	31
4.2.2	<i>Simulación de escenarios</i> .....	34
4.3	REALIZACIÓN DEL ACV .....	35
4.3.1	<i>Objetivos y alcance</i> .....	35
4.3.2	<i>Análisis de inventario:</i> .....	35
4.3.3	<i>Evaluación de impacto ambiental:</i> .....	35
4.3.4	<i>Interpretación de resultados:</i> .....	35
<b>5</b>	<b>CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>36</b>
5.1	LOCALIZACIÓN .....	36
5.2	DESCRIPCIÓN.....	36
5.2.1	<i>Captación de agua de mar</i> .....	37
5.2.2	<i>Pretratamiento</i> .....	37
5.2.3	<i>Osmosis inversa</i> .....	38
5.2.4	<i>Tanque de almacenamiento con bomba tanque</i> .....	39
5.2.5	<i>Sistema de impulsión para transporte de agua desalinizada</i> .....	40
5.3	COMUNIDADES CERCANAS .....	41
5.3.1	<i>Transporte agua desalinizada a comunidad</i> .....	42
<b>6</b>	<b>DESARROLLO DE ACV Y RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
6.1	ALCANCES Y UNIDAD FUNCIONAL DEL ACV .....	45
6.1.1	<i>Alcance del sistema</i> .....	45
6.1.1.1	Fase de construcción.....	45
6.1.1.2	Fase de operación.....	47
6.1.1.3	Transporte del agua desalinizada.....	50
6.1.2	<i>Unidad funcional</i> .....	50
6.2	ANÁLISIS DE INVENTARIO.....	50

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

6.3	EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL .....	54
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>79</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>83</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>85</b>

## Índice de Figuras

FIGURA 2.1. ESQUEMA DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR (FUENTE: CABERO, 2014). .....	8
FIGURA 2.2. ESQUEMA DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA (FUENTE: RALUY & SERRA, 2006). .....	11
FIGURA 3.1. ESQUEMA DE UN ACV (FUENTE: NORMA UNE-EN-ISO 14040, 2006). .....	20
FIGURA 3.2. ESQUEMA GENERAL DE LA ETAPA DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA (FUENTE: PUIG ET AL., 2000). .....	22
FIGURA 3.3: ELEMENTOS DE LA ETAPA DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CICLO DE VIDA (FUENTE: NORMA ISO 14040, 2006) .....	23
FIGURA 3.4. ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MEDIANTE UN EJEMPLO PARA LA CATEGORÍA DE CALENTAMIENTO GLOBAL CON MÉTODO DE EVALUACIÓN IPCC 2007 (FUENTE: VALLEJO, 2004). .....	27
FIGURA 5.1. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DEL AGUA DESALINIZADA CASO NO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	41
FIGURA 5.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO (FUENTE: GOOGLE EARTH, 2021). .....	42
FIGURA 5.3. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DEL AGUA DESALINIZADA CASO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	43
FIGURA 6.1. DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE DESALINIZACIÓN NO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). 48	
FIGURA 6.2. DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO DE DESALINIZACIÓN SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	48
FIGURA 10.1. DETERMINACIÓN DE DISTANCIA DEL ACUEDUCTO PARA TRANSPORTE DE AGUA HACIA COMUNIDAD (FUENTE: GOOGLE EARTH, 2021). .....	132
FIGURA 10.2. CÓDIGO UTILIZADO PARA CALCULAR EL FACTOR DE FRICCIÓN DE DARCY EN MATLAB (FUENTE: JIMÉNEZ, 2016). .....	133

## Índice de Tablas

TABLA 2.1. CATASTRO DE PLANTAS DESALINIZADORAS Y SISTEMAS DE IMPULSIÓN DE AGUA DE MAR OPERATIVAS PARA LA MINERÍA DEL COBRE EN CHILE (FUENTE: COCHILCO, 2020).....	9
TABLA 2.2. FUTUROS PROYECTOS DE PLANTAS DE DESALINIZACIÓN Y SISTEMAS DE IMPULSIÓN DE AGUA DE MAR (FUENTE: COCHILCO, 2020).....	10
TABLA 2.3. TABLA RESUMEN CON ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE IMPACTOS AMBIENTALES EN PLANTAS DESALINIZADORAS (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	15
TABLA 3.1. CATEGORÍAS DE IMPACTO A EVALUAR DURANTE EL ESTUDIO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)....	25
TABLA 3.2. BASES DE DATOS IMPORTADAS PARA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	29
TABLA 4.1. DESCRIPCIÓN ESCENARIO 1 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	31
TABLA 4.2. DESCRIPCIÓN ESCENARIO 2 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	31
TABLA 4.3. DESCRIPCIÓN ESCENARIO 3 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	32
TABLA 4.4. DESCRIPCIÓN ESCENARIO 4 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	32
TABLA 4.5. DESCRIPCIÓN ESCENARIO 5 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	33
TABLA 4.6. DESCRIPCIÓN ESCENARIO 6 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	33
TABLA 5.1. PARÁMETROS GENERALES PLANTA DESALINIZADORA (FUENTE: EIA PLANTA DESALINIZADORA MINERA CANDELARIA, 2011). ....	36
TABLA 5.2. ESTACIÓN DE BOMBEO ETAPA DE CAPTACIÓN (FUENTE: MENA, 2016).....	37
TABLA 5.3. CONSUMO ENERGÉTICO ETAPA CAPTACIÓN AGUA DE MAR (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	37
TABLA 5.4. COMPRESOR AQUADAF, PRETRATAMIENTO (FUENTE: MENA, 2016). ....	37
TABLA 5.5. BOMBAS DE CIRCULACIÓN, PRETRATAMIENTO (FUENTE: MENA, 2016). ....	38
TABLA 5.6. BOMBA RETROLAVADO, PRETRATAMIENTO (FUENTE: MENA, 2016).....	38
TABLA 5.7. CONSUMO ENERGÉTICO ETAPA PRETRATAMIENTO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	38
TABLA 5.8. BOMBA DE ALTA PRESIÓN EN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA (FUENTE: MENA, 2016).....	39
TABLA 5.9. BOMBA POTENCIADORA EN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA (FUENTE: MENA, 2016).....	39
TABLA 5.10. CONSUMO ENERGÉTICO ETAPA DE OSMOSIS INVERSA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	39
TABLA 5.11. BOMBA TANQUE DE ALMACENAMIENTO (FUENTE: MENA, 2016). ....	40
TABLA 5.12. CONSUMO ENERGÉTICO TANQUE DE ALMACENAMIENTO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	40
TABLA 5.13. ACUEDUCTOS INVOLUCRADOS EN EL TRANSPORTE DE AGUA DESALINIZADA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	40
TABLA 5.14. CONSUMO ENERGÉTICO TRANSPORTE AGUA DESALINIZADA A FAENA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	41

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

TABLA 5.15. DISTRIBUCIÓN DE AGUA DESALINIZADA EN MODELO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	43
TABLA 5.16. CONSUMO ENERGÉTICO TRANSPORTE DE AGUA DESALINIZADA SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	44
TABLA 6.1. PARÁMETROS TÉCNICOS TRANSPORTE DE AGUA DESALINIZADA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	50
TABLA 6.3. INPUTS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO PLANTA DESALINIZADORA (FUENTE: EIA PROYECTO PLANTA DESALINIZADORA MINERA CANDELARIA, 2011). .....	51
TABLA 6.4. INPUTS ASOCIADOS A LA CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO ACUEDUCTO CHAMONATE-CANDELARIA (FUENTE: FICHA DEL PROYECTO CHAMONATE-CANDELARIA, 2008). .....	51
TABLA 6.5. OUTPUTS RESULTANTES DE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN (FUENTE: EIA PROYECTO PLANTA DESALINIZADORA MINERA CANDELARIA, 2011). .....	51
TABLA 6.6. INPUTS UTILIZADOS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DEL PROCESO DE DESALINIZACIÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	52
TABLA 6.7. OUTPUTS RESULTANTES DEL PROCESO DE DESALINIZACIÓN (FUENTE: EIA PROYECTO PLANTA DESALINIZADORA MINERA CANDELARIA, 2011). .....	52
TABLA 6.8. COMPOSICIÓN DEL FLUJO DE DESCARGA AL OCÉANO (FUENTE: EIA PROYECTO PLANTA DESALINIZADORA MINERA CANDELARIA, 2011). .....	53
TABLA 6.9. RESUMEN PRINCIPALES CATEGORÍAS DE IMPACTO CASOS SWAP VS NO SWAP ESCENARIO 2 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	60
TABLA 6.10. RESUMEN PRINCIPALES CATEGORÍAS DE IMPACTO CASOS SWAP VS NO SWAP ESCENARIO 3 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	63
TABLA 6.11. RESUMEN PRINCIPALES CATEGORÍAS DE IMPACTO CASOS SWAP VS NO SWAP ESCENARIO 4 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	66
TABLA 6.12. RESUMEN PRINCIPALES CATEGORÍAS DE IMPACTO CASOS SWAP VS NO SWAP ESCENARIO 5 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	69
TABLA 6.13. RESUMEN PRINCIPALES CATEGORÍAS DE IMPACTO CASOS SWAP VS NO SWAP ESCENARIO 6 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	73
TABLA 6.14. COMPARATIVA DEL APORTE DE CADA ETAPA AL CAMBIO CLIMÁTICO SEGÚN EL ESCENARIO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	78
TABLA 10.1. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2011 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	89
TABLA 10.2. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2012 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	90
TABLA 10.3. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2013 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	91

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

TABLA 10.4. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2014 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	92
TABLA 10.5. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2015 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	93
TABLA 10.6. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2016 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	94
TABLA 10.7. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2017 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	95
TABLA 10.8. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2018 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	96
TABLA 10.9. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2019 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	97
TABLA 10.10. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2020 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	98
TABLA 10.11. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2021 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	99
TABLA 10.12. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2022 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	100
TABLA 10.13. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2023 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	101
TABLA 10.14. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2024 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	102
TABLA 10.15. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2025 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	103
TABLA 10.16. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2026 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	104
TABLA 10.17. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2027 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	105
TABLA 10.18. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2028 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	106
TABLA 10.19. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2029 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	108
TABLA 10.20. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2030 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	109
TABLA 10.21. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2031 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	110

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

TABLA 10.22. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2032 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	111
TABLA 10.23. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2033 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	112
TABLA 10.24. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2034 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	113
TABLA 10.25. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2035 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	114
TABLA 10.26. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2036 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	115
TABLA 10.27. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2037 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	116
TABLA 10.28. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2038 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	117
TABLA 10.29. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2039 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	118
TABLA 10.30. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2040 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	119
TABLA 10.31. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2041 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	120
TABLA 10.32. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2042 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	121
TABLA 10.33. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2043 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	122
TABLA 10.34. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2044 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	123
TABLA 10.35. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2045 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	124
TABLA 10.36. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2046 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	125
TABLA 10.37. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2047 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	127
TABLA 10.38. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2048 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	128
TABLA 10.39. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2049 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	129

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

TABLA 10.40. INVENTARIO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE 1 [kWh] AÑO 2050 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	130
TABLA 10.41. PARÁMETROS RELEVANTES ACUEDUCTOS ESCENARIO NO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	133
TABLA 10.42. POTENCIA NECESARIA PARA EL TRANSPORTE DE AGUA DESALINIZADA ESCENARIO NO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	134
TABLA 10.43. PARÁMETROS RELEVANTES ACUEDUCTOS ESCENARIO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	134
TABLA 10.44. POTENCIA NECESARIA PARA TRANSPORTE DE AGUA DESALINIZADA ESCENARIO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	134
TABLA 10.45. INPUTS INGRESADOS EN OPENLCA PARA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	135
TABLA 10.46. OUTPUTS INGRESADOS EN OPENLCA PARA LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	137
TABLA 10.47. INPUTS INGRESADOS EN OPENLCA PARA ETAPA DE CAPTACIÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	139
TABLA 10.48. OUTPUTS INGRESADOS EN OPENLCA PARA ETAPA DE CAPTACIÓN (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	140
TABLA 10.49. INPUTS INGRESADOS EN OPENLCA PARA ETAPA DE PRETRATAMIENTO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	141
TABLA 10.50. OUTPUTS INGRESADOS EN OPENLCA PARA ETAPA DE PRETRATAMIENTO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	143
TABLA 10.51. INPUTS INGRESADOS EN OPENLCA PARA ETAPA DE OSMOSIS INVERSA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	144
TABLA 10.52. OUTPUTS INGRESADOS EN OPENLCA PARA ETAPA DE OSMOSIS INVERSA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	145
TABLA 10.53. INPUTS INGRESADOS A OPENLCA PARA ETAPA DE TANQUE DE ALMACENAMIENTO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	149
TABLA 10.54. INPUTS INGRESADOS A OPENLCA PARA ETAPA DE TRANSPORTE DE AGUA DESALINIZADA A FAENA NO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	150
TABLA 10.55. INPUTS INGRESADOS A OPENLCA PARA ETAPA DE TRANSPORTE DE AGUA DESALINIZADA SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).	150

## Índice de Gráficos

GRÁFICO 2.1. CONSUMO DE AGUA POR SECTORES TOTAL PAÍS (FUENTE: DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA, 2016). .....	4
GRÁFICO 2.2. CONSUMO DE AGUA POR SECTORES REGIÓN DE ATACAMA (FUENTE: DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA, 2016). .....	5
GRÁFICO 2.3. DISTRIBUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA TOTAL EN LA INDUSTRIA MINERA DEL COBRE AÑO 2019 (%) (FUENTE: COCHILCO, 2020). .....	6
GRÁFICO 2.4. DISTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES DEL CONSUMO DE AGUA TOTAL EN LA INDUSTRIA MINERA DEL COBRE POR AÑO (FUENTE: COCHILCO, 2020). .....	6
GRÁFICO 2.5. DISTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES DEL CONSUMO DE AGUA TOTAL EN LA INDUSTRIA MINERA DEL COBRE POR AÑO (FUENTE: COCHILCO, 2020). .....	7
GRÁFICO 2.6. CAPACIDAD DESALINIZADORA INSTALADA POR TECNOLOGÍA (CHERIF, 2018). .....	8
GRÁFICO 6.1. CATEGORÍAS DE IMPACTO ESCENARIO 1 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	54
GRÁFICO 6.2. APORTE DE DISTINTAS ETAPAS EN PROCESO DE DESALINIZACIÓN ESCENARIO 1 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	55
GRÁFICO 6.3. CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO 1 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	56
GRÁFICO 6.4. AGOTAMIENTO DE FÓSILES ESCENARIO 1 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	56
GRÁFICO 6.5. AGOTAMIENTO DE METALES ESCENARIO 1 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	56
GRÁFICO 6.6. AGOTAMIENTO CAPA DE OZONO ESCENARIO 1 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	57
GRÁFICO 6.7. TOXICIDAD HUMANA ESCENARIO 1 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	57
GRÁFICO 6.8. VARIACIÓN DEL IMPACTO AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL ESCENARIO 2 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	58
GRÁFICO 6.9. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE METALES DEL ESCENARIO 2 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	58
GRÁFICO 6.10. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE FÓSILES DEL ESCENARIO 2 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	59
GRÁFICO 6.11. DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE CASOS SWAP VS NO SWAP DEL ESCENARIO 2 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	60
GRÁFICO 6.12. VARIACIÓN DEL IMPACTO AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL ESCENARIO 3 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	61
GRÁFICO 6.13. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE METALES DEL ESCENARIO 3 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	62
GRÁFICO 6.14. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE FÓSILES ESCENARIO 3 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	62
GRÁFICO 6.15. DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE CASOS SWAP VS NO SWAP DEL ESCENARIO 3 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .....	63

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

GRÁFICO 6.16. VARIACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO 4 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	64
GRÁFICO 6.17. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE METALES ESCENARIO 4 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .	65
GRÁFICO 6.18. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE FÓSILES ESCENARIO 4 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)....	65
GRÁFICO 6.19. DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE CASOS SWAP VS NO SWAP DEL ESCENARIO 4 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	66
GRÁFICO 6.20. VARIACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO 5 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	67
GRÁFICO 6.21. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE METALES ESCENARIO 5 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .	67
GRÁFICO 6.22. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE FÓSILES ESCENARIO 5 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)....	68
GRÁFICO 6.23. DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE CASOS SWAP VS NO SWAP DEL ESCENARIO 5 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	69
GRÁFICO 6.24. VARIACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO ESCENARIO 6 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	70
GRÁFICO 6.25. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE METALES ESCENARIO 6 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). .	70
GRÁFICO 6.26. VARIACIÓN DEL AGOTAMIENTO DE FÓSILES ESCENARIO 6 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)....	71
GRÁFICO 6.27. APORTE DE ETAPAS DENTRO DE PROCESO DE DESALINIZACIÓN ESCENARIO 6 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	72
GRÁFICO 6.28. DIFERENCIA PORCENTUAL ENTRE CASOS SWAP VS NO SWAP DEL ESCENARIO 6 (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	73
GRÁFICO 6.29. COMPARACIÓN IMPACTO AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LOS 6 ESCENARIOS NO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	74
GRÁFICO 6.30. COMPARACIÓN IMPACTO AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LOS 5 ESCENARIOS SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	75
GRÁFICO 6.31. COMPARACIÓN IMPACTO AL AGOTAMIENTO DE METALES DE LOS 6 ESCENARIOS NO SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	76
GRÁFICO 6.32. COMPARACIÓN IMPACTO AL AGOTAMIENTO DE METALES DE LOS 5 ESCENARIOS SWAP (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ....	77

## **Nomenclatura**

### **SIGLAS**

IDA	: International Desalination Association
ISO	: International Organization for Standardization
COCHILCO	: Comisión Chilena del Cobre
ACERA	: Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento
DGA	: Dirección General del Agua
BCN	: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
CNE	: Comisión Nacional de Energía
SIC	: Sistema interconectado central
SING	: Sistema interconectado del norte grande
SEN	: Sistema eléctrico nacional

### **ABREVIACIONES**

ACV	: Análisis del ciclo de vida
ICV	: Inventario del ciclo de vida
EICV	: Evaluación de impactos del ciclo de vida
SIAM	: Sistemas de impulsión de agua de mar
ERNC	: Energías renovables no convencionales
EIA	: Estudio de impacto ambiental
GEI	: Gases de efecto invernadero

### **SIMBOLOGÍAS**

Kg	: Kilogramos
kw	: Kilovatios
l	: Litro
m <sup>2</sup>	: Metro cuadrado
m <sup>3</sup>	: Metro cúbico
s	: Segundo
t	: Tonelada
w	: Vatios

## 1 Introducción

El agua es un recurso estratégico y esencial en la industria minera ya que es altamente utilizado en el procesamiento de los minerales, debido a su escasez y el aumento de su demanda con el transcurso de los años, se ha transformado en una gran problemática por enfrentar en el corto y largo plazo (Cochilco, 2020).

Para enfrentar los desafíos asociados a la escasez del recurso hídrico, a lo largo de los últimos años, en las empresas mineras se ha masificado la utilización del agua de mar en sus procesos, siendo el sector con mayor aprovechamiento de este bien, permitiendo además, una creciente mejora en las tecnologías de impulsión del agua de mar. De esta forma, la desalinización de agua de mar ha cobrado fuerza y se visualiza como la alternativa más conveniente para el desarrollo y seguridad hídrica futura del rubro minero, esto ya que permite independizarse tanto de las variaciones climáticas como de los conflictos que pudieran surgir con otros usuarios por el uso u obtención de este recurso.

El proceso de desalinización consiste en la eliminación de sales disueltas en el agua de mar, produciendo de este modo el agua dulce. Para poder realizar esto existen muchas tecnologías, pero actualmente la osmosis inversa es la más utilizada a nivel mundial con aproximadamente el 65% de la capacidad de desalinización (IDA, 2014).

Si bien este proceso es capaz de proveer agua de buena calidad para el uso minero, genera algunas controversias debido al impacto ambiental que trae consigo. Entre ellos destacan la gran cantidad de energía eléctrica utilizada, es decir, de alguna forma se soluciona el problema hídrico para transformarse en uno energético. Lo anterior debido al hecho de tener que revertir un proceso natural como lo es la osmosis y el de transportar mediante tuberías el agua desde el mar a la planta y luego a faenas mineras que normalmente se encuentran por sobre los 2000 msnm (Cochilco, 2020). Para contrarrestar esto y obtener una mayor sustentabilidad, es que se recomienda la utilización de energías renovables como fuente energética de una planta desalinizadora. Sin embargo, a pesar de que Chile es considerado un país privilegiado en este tipo de fuentes, estas aún no se han utilizado y masificado en las diversas plantas desalinizadoras que se encuentran vigentes. Otro impacto importante de la planta desalinizadora es la generación de salmuera, que corresponde al agua saturada que se produce como residuo del proceso de desalinización, esta puede llegar a tener entre 1.3 a 1.7 veces más de salinidad que el agua del océano, y generalmente es devuelta al mar (Sadhvani et al., 2005). Como consecuencia de esto, se obtiene la contaminación del océano, aumentando su temperatura y disminuyendo el oxígeno en este.

El presente trabajo consiste en la evaluación del impacto ambiental generado por la planta desalinizadora de Minera Candelaria, ubicada en la tercera región de Atacama. Para esto, se comparan seis escenarios que se diferencian entre sí por el tipo de energía eléctrica utilizado, se evalúan diversas combinaciones y como objetivo principal se encuentra el identificar la

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

óptima, desde un punto de vista ambiental, para la realización del proceso. Además, se estudia la realización de un intercambio o “Swapping” con las comunidades que comparten lugar junto a la faena minera. Finalmente, se busca analizar los resultados de distintas categorías de impacto ambiental y localizar los puntos críticos donde se concentra la mayor cantidad de flujos energéticos, de materia prima y emisiones al medio.

Para el desarrollo de este estudio se utiliza el análisis del ciclo de vida, una metodología objetiva que está normada por la International Organization for Standardization en lo que se conoce como las series de Normas ISO 14000 sobre ACV. Como complemento a esta, es necesaria la utilización de la información dispuesta por el EIA de la planta desalinizadora de Minera Candelaria, donde se especifican los inputs y outputs de la planta para su funcionamiento, la composición de la matriz eléctrica nacional de acuerdo al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), una serie de bases de datos con inventarios y cadenas de valor de producción de diversos insumos, dispuestas por OpenLCA Nexus y finalmente, el software computacional de aplicación OpenLCA.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general**

- Evaluar y cuantificar diversos impactos ambientales asociados a una planta desalinizadora por osmosis inversa, usando distintas fuentes eléctricas.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

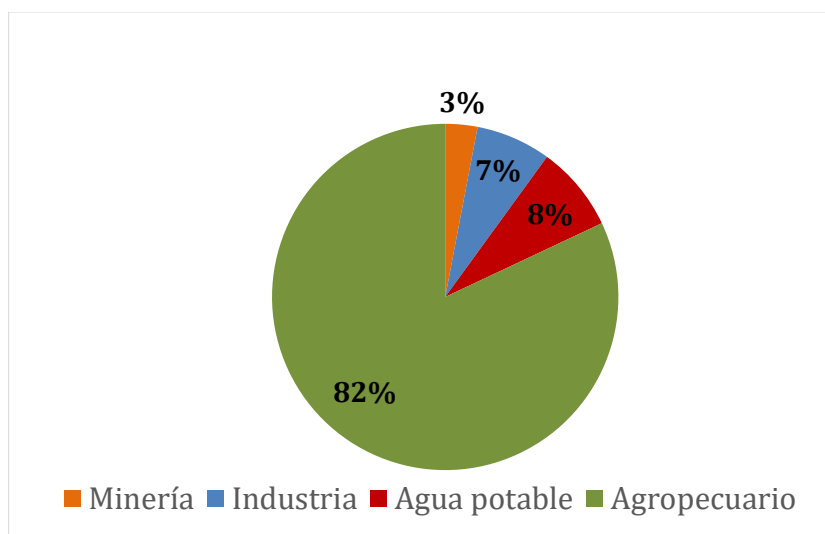
- Construir un modelo de la operación, con sus respectivas etapas, de la planta desalinizadora de Minera Candelaria.
- Elaborar un análisis del ciclo de vida para la planta desalinizadora de Minera Candelaria.
- Identificar los puntos críticos donde se concentra la mayor cantidad de flujos energéticos, de materia prima y emisiones al medio para llevar a cabo el proceso de desalinización.
- Comparar el desempeño ambiental de la planta desalinizadora alimentada mediante diversas fuentes energéticas.
- Evaluar diferentes destinos para el uso del agua proveniente de la planta desalinizadora: en su totalidad utilizado por la faena minera y, por otro lado, de un sistema “swap” que considere compartir agua con comunidades cercanas.
- Identificar oportunidades de mejorar el desempeño ambiental de la planta desalinizadora.

## 2 Antecedentes

### 2.1 Consumo total de agua

#### 2.1.1 Nacional

El Atlas del Agua publicado en 2016 por la Dirección General de Aguas (DGA), detalla las fuentes de suministro hídrico y, para poner en contexto las cifras de la minería, en el gráfico 2.1 se presenta la distribución de la demanda de agua entre este sector, la industria, el agua potable y el sector agropecuario.

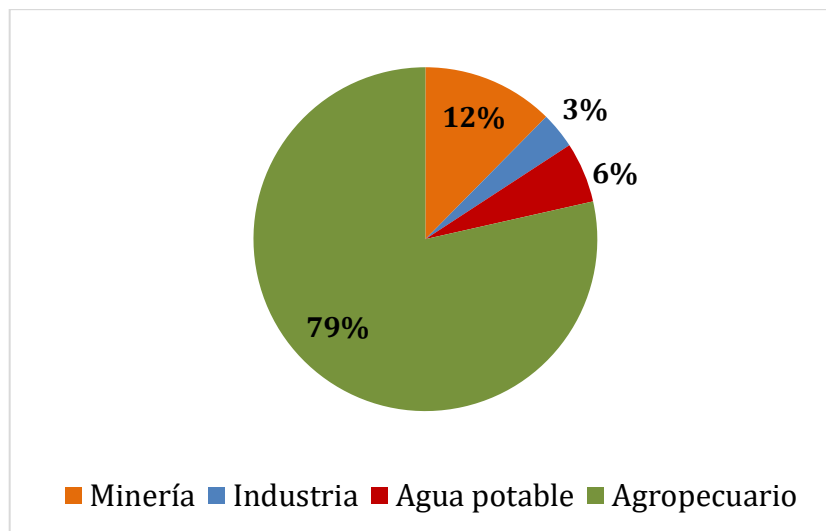


**Gráfico 2.1.** Consumo de agua por sectores total país (Fuente: Dirección General del Agua, 2016).

Para la minería, el agua es un recurso estratégico ya que es esencial para el procesamiento de los minerales. Como contexto nacional, el consumo de agua por parte del sector minero alcanza el 3% según información entregada por la Dirección General de Aguas, siendo el sector con mayor consumo el agropecuario.

#### 2.1.2 Tercera Región de Atacama

A nivel regional, según el Atlas del Agua de 2016, en la tercera región se observa un importante consumo de agua en minería, alcanzando los 1.90 m<sup>3</sup>/s que representan un 12%. Este consumo la ubica en el tercer lugar a nivel nacional, solo tras la Región de Antofagasta con 6.26 m<sup>3</sup>/s y la Región de Aysén con 2.60 m<sup>3</sup>/s. A pesar de esto, el mayor consumo de agua lo genera el rubro agropecuario, muy por sobre el resto de los sectores, como industria con un 3% y agua potable con un 6%, esto queda reflejado en el gráfico 2.2:



**Gráfico 2.2.** Consumo de agua por sectores Región de Atacama (Fuente: Dirección General del Agua, 2016).

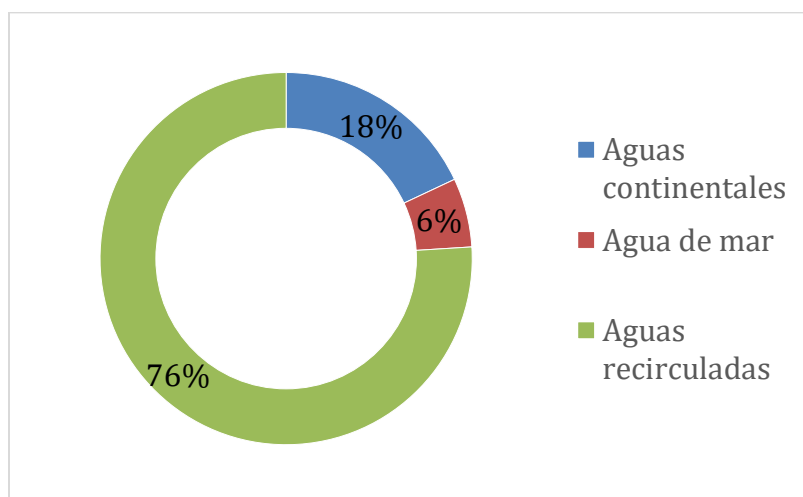
## 2.2 Fuentes de agua en minería

En la industria minería es posible identificar tres grandes fuentes de origen de agua (Cochilco, 2020):

- Agua continental: Considera todos los cuerpos de agua permanentes que se encuentran en el interior del continente, alejados de las zonas costeras. Algunas aguas continentales son ríos, lagos, reservas y humedales entre otros.
- Agua de origen oceánico: Proviene del mar y se caracterizan por su alto contenido de sal y temperaturas propias.
- Aguas recirculadas del proceso minero: Corresponde a todos los flujos de agua utilizados o trabajados en alguna tarea que pueden ser utilizados nuevamente en el mismo u otro proceso dentro del modelo operacional.

En relación con el consumo de agua total reportado en el 2019 por la industria minera de Chile para la obtención de 5,787.4 miles de toneladas de cobre fino producidas, se observa que el agua de origen continental alcanzó los 12.45 m<sup>3</sup>/s, el agua de mar llegó a los 4.06 m<sup>3</sup>/s y el agua recirculada fue de 53.32 m<sup>3</sup>/s, lo que en total suma 69.83 m<sup>3</sup>/s de agua, según se presenta en el siguiente gráfico.

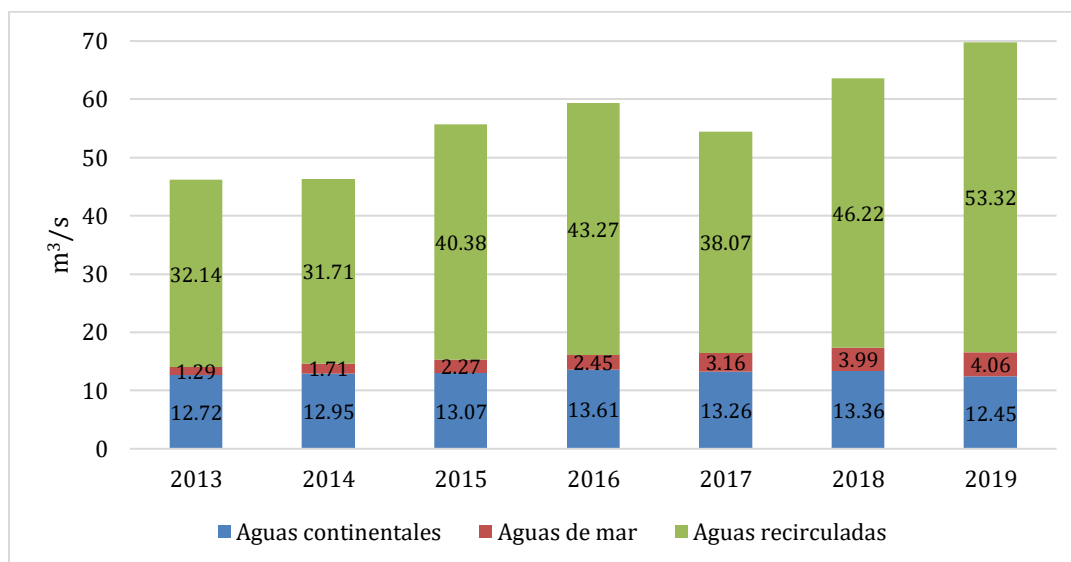
“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”



**Gráfico 2.3.** Distribución del consumo de agua total en la industria minera del cobre año 2019 (%)  
(Fuente: Cochilco, 2020).

Con respecto a la variación de estos consumos de agua globales en la minería en los últimos años, se puede decir que el agua continental se mantiene estable, en el agua de mar se observa una tendencia al alza, mientras que el agua recirculada mantiene variaciones año a año (Cochilco, 2020).

Lo anterior se ve reflejado en el gráfico 2.4:



**Gráfico 2.4.** Distribución de las fuentes del consumo de agua total en la industria minera del cobre por año (Fuente: Cochilco, 2020).

A partir de lo anterior, al comparar el consumo del año 2019 con el del 2018, es posible observar que, en términos desagregados, las aguas continentales presentaron una disminución

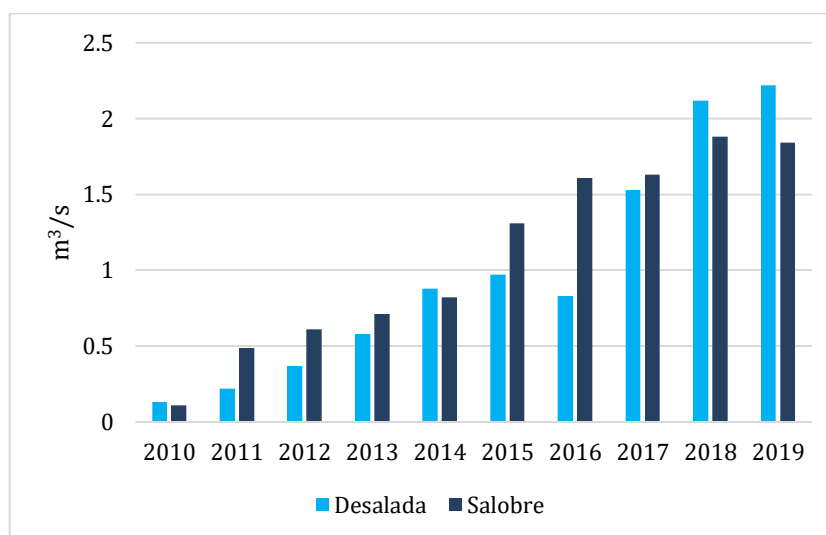
del 6.8%, por su parte las aguas de mar y las aguas recirculadas presentaron un aumento del 1.7% y del 15%, respectivamente.

### 2.3 Agua de mar y desalinización

La menor disponibilidad de agua en el país y la crisis hídrica, especialmente en la zona norte (donde se concentra la actividad minera), ha motivado a las empresas mineras a buscar nuevas fuentes de abastecimiento para asegurar la producción y a su vez, mantener distintas propuestas de valor ante sus comunidades. Lo anterior, ha llevado a las empresas mineras a la utilización del agua de mar en sus procesos, siendo el sector con mayor aprovechamiento de este recurso, promoviendo además una creciente mejora en las tecnologías de impulsión del recurso hídrico (Cochilco, 2020).

Bajo este concepto, el uso de agua de mar, salada o de uso directo, ya es una variable en la evaluación de distintos proyectos y una solicitud constante por un sector de la ciudadanía para mantener la sustentabilidad del sector en su ámbito social.

A continuación, el gráfico 2.5 muestra la evolución del consumo de agua de mar en la minería del cobre desde el año 2010 al 2019, con una tasa de crecimiento promedio anual del orden de 43%.



**Gráfico 2.5.** Distribución de las fuentes del consumo de agua total en la industria minera del cobre por año (Fuente: Cochilco, 2020).

Al 2019 el agua de mar en la minería del cobre alcanzó los 4.06 m<sup>3</sup>/s, que representa un 25% del agua utilizada en minería según fuente de abastecimiento, de los cuales 1.84 m<sup>3</sup>/s corresponden a agua de mar utilizada directamente en los procesos con un alto contenido de sal, mientras que 2.22 m<sup>3</sup>/s es de agua previamente desalinizada. Respecto del 2018, el uso de agua de mar aumentó en 1.7%. Cabe mencionar que el consumo de agua de mar se

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

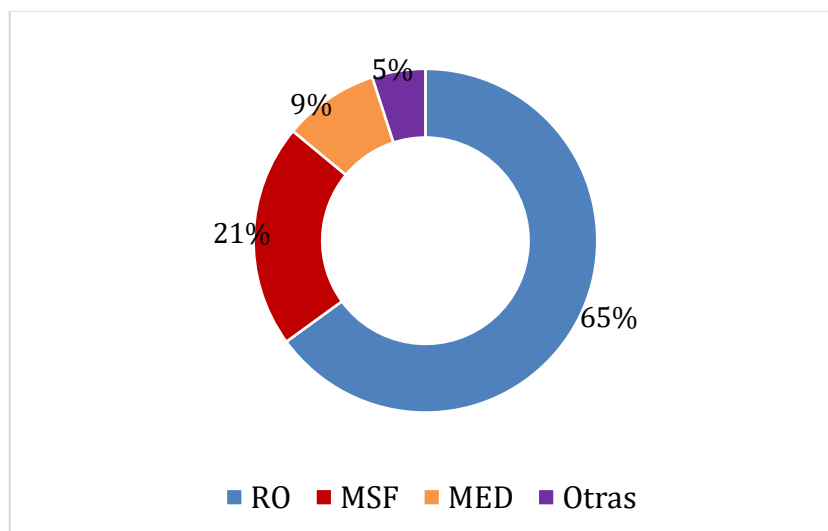
concentra en las regiones de Antofagasta y Atacama, representando el 90% y 10%, respectivamente (Cochilco, 2020).

La desalinización es una tecnología usada por diversos países a nivel mundial y es definida por la Asociación Internacional de Desalación (IDA, por sus siglas en inglés), como el proceso de eliminación de sales disueltas del agua, produciendo de este modo el agua dulce a partir del agua de mar o agua salobre. Esto queda esquematizado en la siguiente figura:



**Figura 2.1.** Esquema desalinización de agua de mar (Fuente: Cabero, 2014).

Actualmente existen alrededor de 20.000 plantas desalinizadoras operando en el mundo (Aladyr, 2019), de diferentes envergaduras, y con distintas tecnologías de obtención, las cuales varían en costos, impacto ambiental, calidad del producto, energía consumida, entre otras. No obstante, todas tienen el mismo objetivo: reducir la concentración de sales disueltas del agua salobre o marina, al grado de producir agua desalinizada. La distribución de las energías de desalinización se puede observar en el gráfico 2.6:



**Gráfico 2.6.** Capacidad desalinizadora instalada por tecnología (Cherif, 2018).

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Las aplicaciones y usos del agua obtenida por desalinización se dividen en los siguientes sectores: 68% para municipios, y 22% para entidades industriales, industria energética (5%), agricultura (2%), y en la industria turística y militar (BCN, 2016).

En lo que corresponde a la minería propiamente tal y bajo el contexto nacional, en la actualidad se encuentran operativas 14 plantas, que se dividen entre desalinizadoras y de impulsión de agua de mar (SIAM). Estas quedan expresadas en la siguiente tabla:

**Tabla 2.1.** Catastro de plantas desalinizadoras y sistemas de impulsión de agua de mar operativas para la minería del cobre en Chile (Fuente: Cochilco, 2020).

Propietario	Mina	Región	Capacidad desalación [Its <sup>3</sup> /s]
Haldeman	Michilla	Antofagasta	75
Enami	Planta J.A Moreno	Antofagasta	-
Las Cenizas	Las Cenizas Taltal	Antofagasta	9
Mantos de la Luna	Mantos de Luna	Antofagasta	20
Pampa Camarones	Pampa Camarones	Arica y Parinacota	-
Antofagasta Minerals	Distrito Centinela	Antofagasta	50
CAP Minería	CAP Minería y otros clientes	Atacama	600
BHP	Escondida – Planta Coloso	Antofagasta	525
Antofagasta Minerals	Antucoya	Antofagasta	20
Lunding Mining	Candelaria	Atacama	300
Mantos Copper	Mantoverde	Atacama	120
KGHM INT.	Sierra Gorda	Antofagasta	-
BHP	Escondida EWS	Antofagasta	2500
Lunding Mining	Candelaria 2030 – continuidad operacional	Atacama	Agrega 200

Por otra parte, pensando en el futuro cercano, la tabla 2.2 muestra el catastro de los proyectos de plantas desalinizadoras con uso directo de agua que se encuentran en carpeta.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

**Tabla 2.2.** *Futuros proyectos de plantas de desalinización y sistemas de impulsión de agua de mar*  
(Fuente: Cochilco, 2020).

Año puesta en marcha	Propietario	Mina	Región	Etapa de desarrollo
2021	Antofagasta Minerals	INCO	Coquimbo	Construcción
2024	CAPSTONE Mining	Santo Domingo	Atacama	Factibilidad
2023	COPEC	Diego de Almagro	Atacama	Factibilidad
2021	BHP	Spence Growth Option	Antofagasta	Construcción
2022	Mantos Copper	Desarrollo Mantoverde	Atacama	Construcción
2023	Teck	Quebrada Blanca Hipógeno	Tarapacá	Construcción
2023	Codelco	Planta desaladora Distrito Norte	Antofagasta	Factibilidad
2024	Collahuasi	Collahuasi	Tarapacá	Factibilidad
2025	Antofagasta Minerals	Distrito Minero Centinela	Antofagasta	Factibilidad
Sin información	Antofagasta Minerals	Distrito Minero Centinela (reemplazo acueducto)	Antofagasta	Factibilidad
2027	Freeport McMoran	Concentradora El Abra	Antofagasta	Sin EIA
2022	ENAPAC		Atacama	Factibilidad
2028	Newmont Goldcorp y Teck	Nueva Unión	Atacama	Factibilidad

A partir de la tabla se puede observar que la III Región de Atacama, zona del estudio, destaca por ser la región que cuenta con una mayor cantidad de proyectos de plantas de desalinización y sistemas de impulsión de agua de mar.

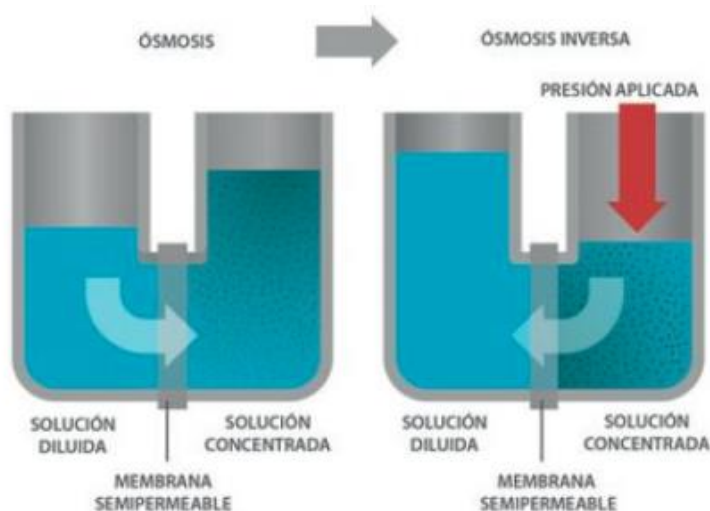
## 2.4 Osmosis inversa

La osmosis inversa (OI) corresponde a la tecnología de desalinización de mayor uso en Chile y el mundo. Esta es una técnica de desmineralización basada en membranas y utilizada para separar sólidos disueltos, tales como iones de una solución. Estas membranas actúan como barreras permeables selectivas que permiten que algunas sustancias tales como el agua permeen a través de ellas mientras retiene otras sustancias disueltas tales como iones. En estas existe una circulación natural de la solución menos concentrada para igualar las

concentraciones finales, con lo que la diferencia de altura obtenida se traduce en una diferencia de presión, denominada osmótica (Arreguín, 2000).

Cuando se aplica una presión externa que es mayor que la presión osmótica de una solución a otra, se puede invertir el proceso haciendo circular el agua de la solución más concentrada y purificando la zona con menor concentración, obteniendo finalmente agua de pureza aceptable.

A partir de este proceso se obtienen como productos el agua desalinizada y la salmuera, esta última corresponde al agua saturada o con alto contenido en sal que es generada como residuo del proceso de desalinización, que puede llegar a tener entre 1.3 a 1.7 veces más de salinidad que el agua del océano, y que generalmente es devuelta al mar (Sadhvani et al., 2005). Lo mencionado anteriormente queda reflejado en la figura 2.2:



**Figura 2.2.** Esquema del proceso de osmosis inversa (Fuente: Raluy & Serra, 2006).

El crecimiento de esta tecnología de desalinización ha sido exponencial durante los últimos años, debido al incremento de productividad, disminución de precios, aumento del rechazo de sales, etc. Aún así, se esperan importantes desarrollos en el futuro próximo ya que existen varias investigaciones en curso, por lo que este proceso no ha llegado aún a su techo tecnológico y hay fundadas esperanzas de lograr en él mejoras significativas, que permitirían rebajar los costos de la desalinización de agua de mar y disminuir los impactos ambientales asociados al proceso (Cochilco, 2020).

## 2.5 Impactos de la desalinización

### 2.5.1 Alto consumo energético

Si bien la alternativa de uso de agua de mar y plantas desalinizadora ha sido de gran ayuda frente al escenario de escasez hídrica y a la disponibilidad de agua para las operaciones mineras, hay que tener en consideración la estrecha relación que existe entre el uso de agua de mar y el consumo energético, pues de una manera u otra se está traspasando el obstáculo de escasez hídrica a un problema energético, esto debido a que en Chile el agua desde el mar hasta la ubicación de las faenas debe ser impulsada a más de 2000 m.s.n.m. y la longitud de las tuberías de transporte de agua miden entre 150-200 km, lo cual demanda un alto consumo energético. El uso de agua de mar no está sólo relacionado con la desalinización sino que con el transporte hasta las faenas mineras (Cochilco, 2020).

Para la determinación de la potencia del motor de la bomba que será empleado en el suministro del agua desalinizada, se utilizan las siguientes relaciones (Mott, 2006):

$$P_T = g * \rho * Q * H$$

Donde:

- $P_T$ : Potencia teórica de bombeo [kW].
- $g$ : Aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ].
- $\rho$ : Densidad del fluido [ $ton/m^3$ ].
- $H$ : Altura de impulsión [m].
- $Q$ : Caudal [ $m^3/s$ ].

$$P_M = \frac{P_T}{\eta}$$

Donde:

- $P_M$ : Potencia consumida [kW].
- $\eta$ : Eficiencia de la bomba [%].

Respecto a todos los factores mencionados, la única incógnita es la altura de impulsión, que representa la presión que es capaz de aumentar la bomba, medido a través de la altura máxima que podría impulsar un fluido en una posición vertical (Mott, 2006). Para efectos de este

estudio, se asume que las presiones y las velocidades, al inicio y final del ducto son similares, por lo que la ecuación queda expresada así:

$$H = H_g + H_f + H_s$$

Donde  $H_g$  corresponde a las pérdidas por desnivel geométrico y está dado por la diferencia de cota entre un punto de bombeo y otro;  $H_s$  corresponde a las pérdidas por singularidades y trata de pérdidas de presión puntuales causadas por elementos como válvulas, aberturas, ensanchamientos y codos, para efectos de esta tesis se considera un valor despreciable ya que por lo general son menores y además no se conoce con exactitud el recorrido de los ductos;  $H_f$  corresponde a las pérdidas de carga por fricción y son aquella que se genera gracias al roce entre el fluido y la tubería, y es conocida como la ecuación Darcy-Weisbach:

$$H_f = f \frac{Lv^2}{2dg}$$

Donde:

- $f$ : Factor de fricción de Darcy [adimensional].
- $L$ : Largo de tubería [m].
- $d$ : Diámetro interno de la tubería [m].
- $g$ : Aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ].
- $v$ : Velocidad de escurrimiento del fluido [m/s].

El factor de fricción de Darcy se calcula con la ecuación que se conoce comúnmente como ecuación de Colebrook-White (mediante métodos numéricos o iterativos). El campo de aplicación de esta fórmula se encuentra en la zona de transición de flujo laminar a turbulento y en la zona de flujo turbulento. Este régimen se determina según el número de Reynolds el cual también determina el factor de fricción de Darcy:

$$\left( \frac{1}{\sqrt{f}} \right) = -2 \log \left( \frac{\frac{\varepsilon}{d}}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Donde:

- $\varepsilon$ : Rugosidad de la tubería [mm].
- $d$ : Diámetro interno de tubería [mm].
- $Re$ : Número de Reynolds [adimensional].

$$Re = \frac{d * v * \rho}{\mu}$$

Donde:

- $v$ : Velocidad media del flujo [m/s].
- $d$ : Diámetro del ducto [m].
- $\rho$ : Densidad del fluido [ton/m<sup>3</sup>].
- $\mu$ : Viscosidad dinámico del fluido [kg\*m<sup>-1</sup>\*s<sup>-1</sup>].

### 2.5.2 Producción y eliminación de salmuera

El manejo de la salmuera es económicamente costoso y técnicamente difícil y, por lo tanto, la mayoría de las plantas de desalinización descargan salmuera no tratada directamente al medio ambiente, pudiendo producir efectos negativos sobre las comunidades vegetales y animales de organismos marinos, llegando a destruir o modificar estructuras ecológicas. No obstante, el grado de afectación dependerá tanto de las condiciones oceanográficas (profundidad, temperatura, recarga natural de agua, entre otras) del lugar de descarga como de la calidad, cantidad y frecuencia del vertido (Jones et al., 2019).

En las plantas desalinizadoras por ósmosis inversa, el caudal de salmuera de descarga es del 30 al 70% del flujo de agua de alimentación, lo que significa 1.3-1.7 veces la concentración de agua de mar (Sadhvani et al., 2005).

La producción mundial actual de salmuera es de 141.5 millones de m<sup>3</sup>/día, totalizando 51.7 mil millones de m<sup>3</sup>/año. Este valor es aproximadamente un 50% mayor que el volumen total de agua desalada producida a nivel mundial (Jones et al., 2019).

A su vez, la eficiencia de recuperación de agua de las operaciones de desalinización depende tanto del tipo de tecnología de desalinización como de la calidad del agua de alimentación utilizada y, por lo tanto, estos dos factores deben considerarse al cuantificar la producción de salmuera (Xu et al., 2013). A partir de esto, cuanto mayor sea la eficiencia de procesamiento volumétrico del proceso de desalinización, menor será la proporción de salmuera producida en relación con el volumen de agua desalada producida.

### 2.5.3 Eliminación de productos químicos

Las descargas de salmuera contienen varios productos químicos utilizados tanto en la etapa de pre como post tratamiento de la planta y en la limpieza de las membranas. Algunos de estos compuestos pueden ser biocidas, detergentes, antiincrustantes y antiespumantes

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por ósmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

(Sadhvani et al., 2005). Todas estas dosis químicas pudiesen generar daños en los ecosistemas marinos.

#### 2.5.4 Ruido

Las plantas desalinizadoras por ósmosis inversa generan ruido en niveles importantes, superiores a 90 [dB] debido al funcionamiento de las bombas de alta presión y recuperación de energía sistemas, como turbinas o similares. Debido a esto, deben ubicarse lejos de zonas pobladas y equipado con tecnología acústica adecuada para reducir nivel de ruido (Sadhvani et al., 2005).

#### 2.5.5 Estudios previos sobre evaluación de impactos ambientales

Se complementa la información con una revisión bibliográfica de los principales trabajos de investigación publicados recientemente sobre la evaluación de impactos ambientales en las plantas desalinizadoras y la aplicación de la metodología ACV en algunas de ellas, esto queda resumido en la tabla 2.3:

**Tabla 2.3.** *Tabla resumen con estudios realizados sobre impactos ambientales en plantas desalinizadoras (Fuente: Elaboración propia).*

Autor	Fecha	Temática	País	Highlights
Jones et al	2019	Producción de salmuera.	Visión global	La producción de salmuera es de alrededor de 142 m <sup>3</sup> /día.
Heihsel et al	2019	Análisis input-output de la desalinización por OI de agua de mar para 2005-2015.	Australia	Emisiones totales para 2015 en 1193 [kt] CO <sub>2</sub> e con el sector eléctrico como decisivo.
Molinos-Senante et al	2018	Evaluación de la economía de desalación mediante la integración de los costos de emisión de GEI.	Chile	La energía es el costo más importante, ya que contribuye con más del 50% del total de operación. Sin embargo, el costo de la energía disminuye hasta un 68% cuando proviene de energías renovables.
Habib Cherif et al	2018	ACV en procesos de desalinización de agua.	Visión global	El consumo energético para la tecnología OI esta entre 3.5-5 kWh/m <sup>3</sup> . Además, plantea una distribución de energía para una planta de OI típica.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Missimer et al	2018	Problemas ambientales en plantas desalinizadoras por OI.	Estados Unidos	Determina que el impacto ambiental más importante es la descarga de la salmuera al océano. Propone como solución su dilución, el uso de difusores y la restauración de hábitat o la repoblación del mar con especies críticas.
Miller et al	2015	Cuestiones energéticas y medioambientales en la desalación.	Israel	El consumo energético para una planta mediana de OI es de 5 kWh/m <sup>3</sup> y representa un bajo porcentaje dentro del país. Además, plantea que el impacto de la salmuera en el océano es casi nulo.
Shahabi et al	2015	Evaluación ambiental y económica en desalinización mediante toma de pozos de playa versus toma abierta.	Australia	La electricidad en la fase operativa contribuyó con más del 75% de los impactos totales. Por otra parte, la construcción de la planta representa un impacto ambiental menor al 4% del total.
Shahabi et al	2013	ACV en planta desalinizadora por OI alimentada con energía renovable.	Australia	La planta impulsada por combustibles fósiles produjo emisiones un 90% más altas que las de energías renovables.

## 2.6 Fuentes de energía

### 2.6.1 Sistemas eléctricos en el territorio nacional

El mercado eléctrico chileno está compuesto por tres sistemas independientes:

- **Sistema Eléctrico Nacional (SEN):** Sistema creado en 2017 mediante la interconexión del Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). Abarca 3100 km, lo cual es gran parte del territorio de Chile, desde Arica por el norte, hasta la isla de Chiloé por el sur (Generadoras de Chile, 2019). La generación eléctrica de la matriz varía de acuerdo al año (anexo 2)

pero esta compuesta casi en su totalidad por las fuentes solar fotovoltaica, eólica, hidráulica, geotérmica, biomasa, cogeneración, en base a carbón, petróleo y gas natural.

- **Sistema de Aysén (SEA):** Sistema que produce electricidad para abastecer la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. A diciembre de 2017 posee una capacidad instalada neta de 62 MW, con un 57% diésel, 37% hidráulica y 6% eólica (Generadoras de Chile, 2019).
- **Sistema de Magallanes (SEM):** Sistema que produce electricidad para abastecer las Regiones de Magallanes y de la Antártica Chilena. A diciembre de 2017 posee una capacidad instalada neta de 104 MW, con un 82% gas natural, 15% diésel, y 3% eólica (Generadoras de Chile, 2019).

### 2.6.2 Energías renovables no convencionales

Las energías renovables no convencionales, corresponden a todas aquellas fuentes de generación energética en las cuales no se incurre en el consumo gasto o agotamiento de su fuente generadora (Revista Energía, 2012). Algunas de las más utilizadas se describen a continuación:

#### 2.6.2.1 Energía solar

Es la energía renovable no convencional de mayor boga estos últimos años a nivel nacional, por nutrirse de una fuente energética inagotable y al alcance de todos como es la radiación de la luz solar. De ella se puede obtener al unísono calor y electricidad. La energía eléctrica, se genera gracias a la utilización de paneles fotovoltaicos, los que están conformados por las denominadas “celdas” que permiten capturar la energía solar, para luego transformarla en electricidad (Revista Energía, 2012).

A nivel mundial se conoce una región llamada Cinturón del Sol y que corresponde al área con la mejor intensidad de radiación solar. Esta zona cubre casi la mitad de Chile, lo que significa un potencial de generación muy grande.

#### 2.6.2.2 Energía eólica

Es la fuente energética que aprovecha la fuerza mecánica del viento, la cual mueve una turbina interna, que posteriormente conducirá la energía a un generador para transformarla en electricidad. Los aerogeneradores necesitan de vientos constantes, a lo contrario de lo que comúnmente se cree, no necesariamente fuertes, por lo que su ubicación se limita a determinados sectores del territorio nacional (Revista Energía, 2012).

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

En Chile los terrenos con buenas condiciones para aprovechar el recurso eólico son numerosos y se ubican a lo largo de todo el país, destacándose principalmente las zonas costeras.

### 2.6.2.3 Energía Hidráulica

La hidroelectricidad es una fuente de energía renovable proveniente del agua, es una fuente limpia y es la más utilizada en el mundo, totalizando un 71% de la generación de energía renovable. La energía hidroeléctrica se basa en el principio de conservación de la energía, aprovechando la energía potencial del agua cuando se encuentra a una altura superior respecto a un punto de descarga (Generadoras, 2016).

## 2.7 Energías renovables en plantas desalinizadoras

La autosuficiencia y el apoyo local se pueden lograr tanto con los sistemas de energía renovable como con los de desalinización (Eltawil et al., 2008). En general, la integración de la desalinización con la energía renovable se puede aplicar mediante el uso directo de calor, por la energía mecánica o mediante la generación de energía eléctrica. Se han realizado numerosos esfuerzos en todo el mundo para encontrar el acoplamiento adecuado entre la desalinización y los recursos energéticos renovables (Shouman et al., 2015).

Es importante considerar una serie de factores para hacer coincidir las energías renovables con las unidades de desalinización. Para lograr una combinación efectiva entre ambas tecnologías, deben estudiarse parámetros locales como: las condiciones geográficas, la topografía del sitio, la capacidad y el tipo de energía disponible a bajo costo, la disponibilidad de infraestructuras locales (considerando la red eléctrica), el tamaño de la planta o sistema desalinizador, área de terreno requerida y/o disponible y la alimentación de agua salina o salobre. Es fundamental considerar la efectividad del proceso con respecto al consumo de energía, así como, tener en cuenta criterios de robustez y simplicidad de operación, mantenimiento simple y tamaño compacto del proceso de desalinización (Eltawil et al., 2008).

### **3 Análisis del ciclo de vida (ACV)**

#### **3.1 Origen**

El análisis de ciclo de vida tuvo sus inicios en la década de 1960. Éste surge como resultado de las preocupaciones por las limitaciones de las materias primas y los recursos energéticos. Esto despertó el interés por encontrar formas de contabilizar de manera acumulativa el uso de energía que permitiera crear una proyección del suministro y el uso de recursos en el futuro (Curran, 2008).

Uno de los primeros estudios en los que se comenzaron para tener en cuenta los impactos ambientales de los productos fue realizado por Harold Smith, quien lo presentó en la Conferencia Mundial de Energía de 1963, donde incluía las cantidades de energía para la fabricación de productos químicos (Vargas, 2008).

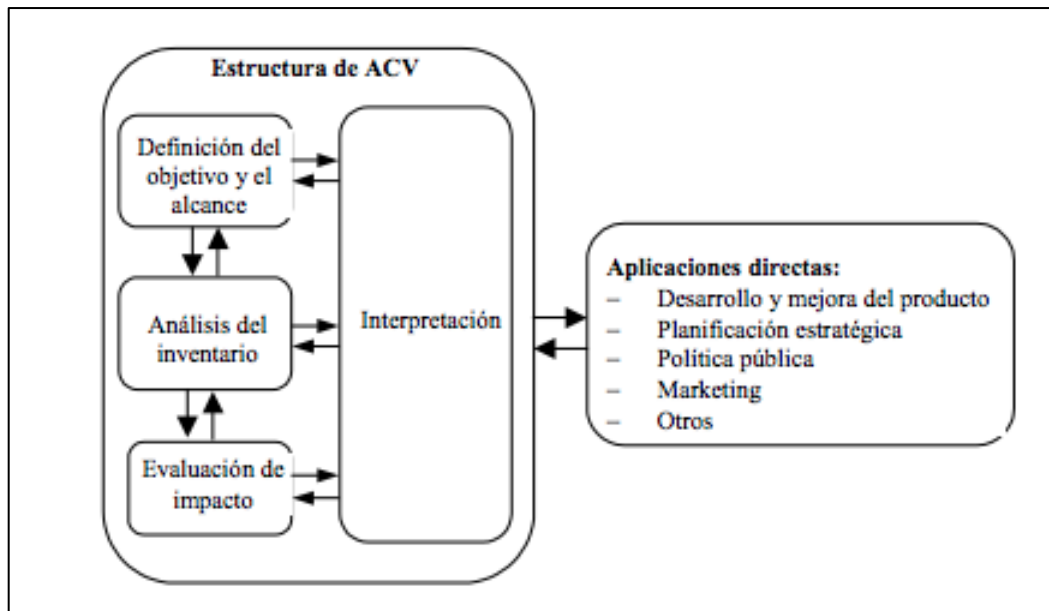
#### **3.2 Definición del ACV**

El correcto empleo de la herramienta de análisis de ciclo de vida está especificado por las normas ISO (International Organization for Standardization) 14040:2006, Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia, y la ISO 14044:2006, Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. Estas corresponden a las últimas revisiones de la estandarización europea de la metodología del ACV.

A partir de las certificaciones internacionales antes mencionadas, el ACV se define como una metodología que estudia los aspectos medioambientales y los impactos potenciales a lo largo de la vida del producto (de la cuna a la tumba) desde la adquisición de las materias primas hasta la producción, uso y eliminación.

Dicho proceso consta de cuatro etapas que se encuentran en constante interacción: Definición de objetivos y alcances, análisis del inventario, evaluación del impacto ambiental y la interpretación de los resultados. El esquema que propone la norma se refleja en la figura 3.1:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”



*Figura 3.1. Esquema de un ACV (Fuente: norma UNE-EN-ISO 14040, 2006).*

### 3.3 Etapas del ACV

#### 3.3.1 Definición del objetivo y el alcance

La primera etapa en todo ACV es determinar los objetivos y el alcance del estudio. Esta etapa a su vez puede subdividirse en las siguientes fases:

- Definición de objetivos: La definición de objetivos debe incluir de forma clara, cuál es la razón que nos lleva a realizar un estudio de este tipo y el uso que se pretende dar a los resultados. Del mismo modo, esta fase debe establecer la aplicación prevista, las razones para realizar el estudio, el público previsto, es decir, las personas a las que se prevé comunicar los resultados del estudio y si se prevé utilizar los resultados en aseveraciones comparativas que se divulgarán en público.
- Definición del alcance: El alcance define el sistema del producto a estudiar, las funciones del sistema del producto o en caso de estudios comparativos, los sistemas, la unidad funcional, los límites del sistema, los procedimientos de asignación, las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación del impacto, y la subsecuente interpretación a utilizar, los requisitos relativos a los datos, las

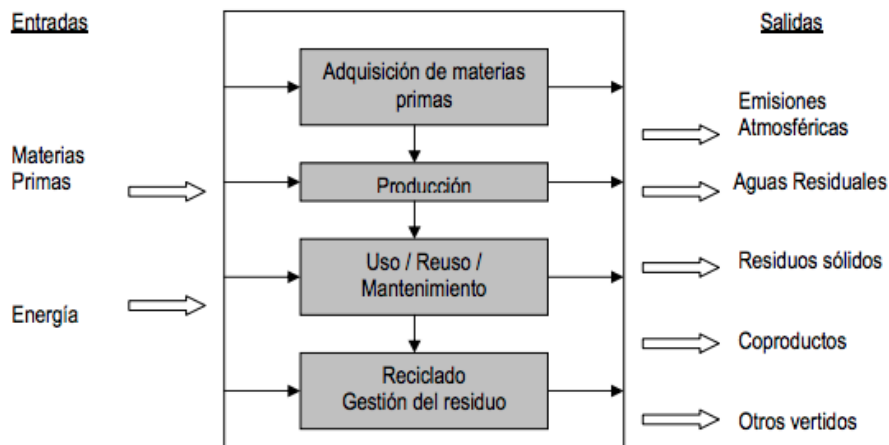
suposiciones, las limitaciones, los requisitos iniciales de calidad de los datos. En resumen, el alcance debe definirse de forma que se asegure que la profundidad del estudio es compatible con los objetivos definidos inicialmente.

- **Definición de la unidad funcional:** La unidad funcional es aquélla a la que irán referidas todas las entradas y salidas del sistema. La unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas (características de desempeño) del producto. El propósito fundamental de una unidad funcional es proporcionar una referencia con la cual se relacionan las entradas y salidas. Se necesita esta referencia para asegurar que los resultados del ACV son comparables.
- **Definición de un procedimiento que garantice la calidad de los datos:** La calidad de los datos de un ACV se define como el grado de fiabilidad de los datos de entrada y salida, tanto de forma individual como global, y, por tanto, de las decisiones que se tomarán a partir de los resultados. Los datos deben tratar: tiempo, geografía, tecnología., precisión, integridad, representatividad, coherencia, reproducibilidad, fuentes de los datos e incertidumbre de la información (datos, modelos y suposiciones).

### **3.3.2 Análisis del inventario del ciclo de vida**

La etapa de inventario consiste en contabilizar los distintos impactos medioambientales que el sistema en estudio ejerce sobre el medio. Por tanto, cada una de las etapas o procesos individuales se considera como un subsistema. Para cada uno de los subsistemas se especifican las materias primas, materias auxiliares, energía utilizada y emisiones medioambientales. La figura 3.2 representa lo mencionado anteriormente:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”



**Figura 3.2.** Esquema general de la etapa del inventario del ciclo de vida (Fuente: Puig et al., 2000).

El resultado que se obtiene del inventario es la cuantificación de las emisiones al medio ambiente, diferenciando entre emisiones atmosféricas, vertidos líquidos, y residuos sólidos. Existen diferentes bases de datos comerciales que incorporan los resultados de estudios de inventario del ciclo de vida aplicados a diferentes materiales y procesos, de forma que pueden ser utilizadas como fuente de información de elementos minoritarios en otros inventarios.

Cualquier análisis del ciclo de vida que se realice requiere la utilización de un gran número de datos individuales procedentes de diferentes fuentes/bases de datos. Por tanto, la calidad y credibilidad de los resultados del estudio dependerán en gran medida de la calidad de los datos tomados como partida. Algunos ejemplos de indicadores de calidad de los datos de inventario son: fuente de información, nivel de agregación, método de recolección de los datos, edad de los datos, etc.

### 3.3.3 Evaluación de impactos

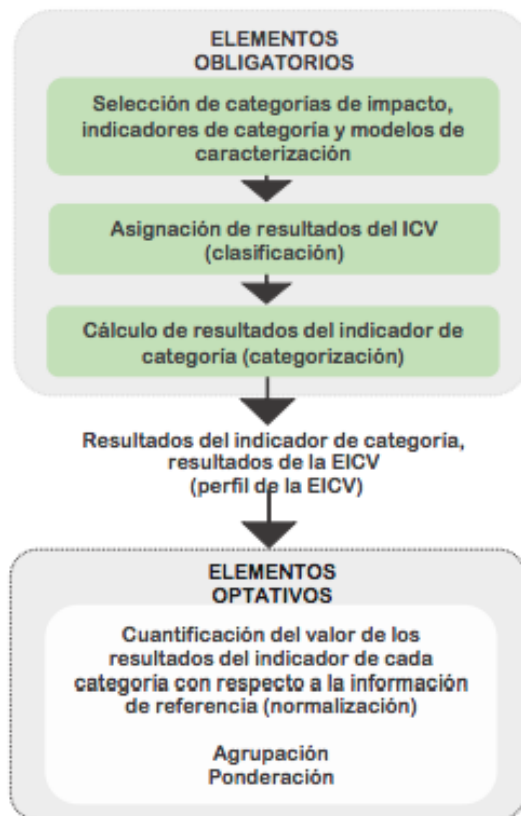
La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) tiene por objeto evaluar la importancia de los impactos ambientales utilizando los resultados obtenidos en la etapa de inventario. El objetivo de esta etapa no es determinar el valor real de los impactos, sino más bien, relacionar los datos de las emisiones cuantificadas en la etapa de inventario con una serie de categorías de impacto definidas previamente, y cuantificar la magnitud relativa de la contribución de cada contaminante a la categoría de impacto correspondiente. Los resultados de una EICV pueden utilizarse para identificar oportunidades de mejora, caracterizar o comparar variaciones de un sistema de productos en el tiempo, comparar sistemas diferentes de producto e identificar variables medioambientales críticas.

Según la norma UNE-EN ISO 14044 (2006), el análisis de impacto puede realizarse a dos niveles:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

- Con elementos obligatorios: En esta fase del EICV se seleccionan las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización que se van a considerar. A continuación se asignan los resultados del ICV a las categorías de impacto (clasificación) y se calculan los resultados de los indicadores de categoría (caracterización) obteniendo así el perfil de la EICV del sistema en estudio.
- Con elementos opcionales: Permiten obtener un único indicador que engloba toda la información del inventario mediante la aplicación de un método de evaluación del impacto.

Todo lo mencionado anteriormente queda esquematizado en la figura 3.3:



**Figura 3.3:** Elementos de la etapa de evaluación de impactos del ciclo de vida (Fuente: Norma ISO 14040, 2006).

### 3.3.3.1 Selección de categorías de impacto

Las categorías de impacto vienen definidas por los distintos modelos disponibles, entre ellos: CML, EcoIndicator 99, ReCiPe, EPC, IMPACTWorld +, Ecological Scarcity, EDIP, EPS, IPCC, etc.

La metodología de evaluación de impacto seleccionada para el presente estudio es la ReCiPe, creada por RIVM, CML, PRé Consultants, Radboud Universiteit, Nijmegen y CE Delft. ReCiPe se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicator 99. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicator 99 es su facilidad de interpretación. Se trata de una metodología reciente (publicada en el año 2008) e internacionalmente aceptada (Ecorae, 2013).

Esta metodología integra el enfoque orientado al problema ambiental y el orientado al daño. Comprende dos grupos de categorías de impacto (Ecorae, 2013):

- Midpoint: Incluye 18 categorías, la incertidumbre de los datos es baja, es decir, los resultados son más fiables y precisos, pero resulta ambigua o difícil de interpretar para audiencias no técnicas
- Endpoint: Incluye 3 categorías, la incertidumbre en los datos es alta pero los resultados son más fáciles de interpretar.

Además, ReCiPe presenta tres factores acorde a tres perspectivas. Estas perspectivas representan un conjunto de aspectos como tiempo a desarrollo de tecnología:

- Individualista (I): Se basa en un interés a corto plazo, con una perspectiva temporal de 100 años o menos. Se asienta en una visión optimista, que supone que los avances tecnológicos resolverán muchos problemas en el futuro.
- Jerárquica (H): Es un modelo de consenso, basado en los principios más comunes respecto a plazo temporal y otros. Es considerado como el modelo por defecto.
- Igualitaria (I): Es la perspectiva más cauta. Posee el periodo de tiempo más largo.

Por todo lo descrito anteriormente es que se decide por tanto tomar la metodología de puntos intermedios desde una perspectiva jerárquica, ReCiPe Midpoint (H), disponible en la herramienta informática a utilizar OpenLCA.

En la tabla 3.1 se presentan las 18 categorías de impacto ambiental evaluadas en la presente investigación y sus correspondientes factores de equivalencia:

**Tabla 3.1.** Categorías de impacto a evaluar durante el estudio (Fuente: Elaboración propia).

Categoría de impacto	Descripción	Indicador
Ocupación de tierras agrícolas	La ocupación de la tierra considera los efectos del uso de la tierra, la extensión de la superficie implicada y la duración de su ocupación.	m <sup>2</sup> a
Cambio climático	Aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas, es causado por la liberación de los "gases de efecto invernadero" como el dióxido de carbono.	kg CO <sub>2</sub> -Eq
Agotamiento de fósiles	Categoría de impacto ambiental que se refiere al uso de combustibles procedentes del petróleo, del carbón o del gas natural no renovable. Se mide en unidades de energía.	kg oil-Eq
Ecotoxicidad de agua dulce	Los impactos tóxicos que afectan al agua dulce, que son nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema.	kg 1,4-DCB-Eq
Eutrofización de agua dulce	Los nutrientes procedentes de vertidos de agua dulce aceleran el crecimiento de las algas y demás vegetación en el agua. La degradación de la materia orgánica consume el oxígeno, lo que provoca una deficiencia de esta sustancia.	kg P-Eq
Toxicidad humana	Los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a la absorción de sustancias tóxicas mediante la inhalación de aire, la ingesta de alimentos o agua, etc. En la medida en que estén relacionados con el cáncer.	kg 1,4-DCB-Eq
Radiación ionizante	Los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a descargas radiactivas.	kg U <sup>235</sup> -Eq
Ecotoxicidad marina	Los impactos tóxicos que afectan a las aguas marinas, que son nocivos para distintas especies y que cambian la estructura y función del ecosistema.	kg 1,4-DCB-Eq
Eutrofización marina	Los nutrientes procedentes de vertidos de agua marina aceleran el crecimiento de las algas y demás vegetación en el agua. La degradación de la materia orgánica consume el oxígeno, lo que provoca una deficiencia de esta sustancia.	kg N-Eq
Agotamiento de recursos minerales	Se refiere al agotamiento de recursos minerales tales como metales o rocas. Hace referencia al consumo de materiales extraídos de la naturaleza.	kg Fe-Eq
Transformación de la tierra	La conversión de una superficie natural por actividades tales como la agricultura, carreteras, viviendas, minería, etc. La transformación de la tierra	m <sup>2</sup>

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

	considera los efectos del uso de la tierra y su extensión.	
Reducción de la Capa de Ozono	Corresponde a la degradación del ozono estratosférico debida a las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono como, por ejemplo, gases de vida larga que contienen cloro y bromo.	Kg. Eq. CFC-11
Formación de partículas	Corresponde a los efectos nocivos sobre la salud humana debidos a las emisiones de partículas y sus precursores (NOx , SOx , NH3 ). Pequeñas partículas con menos de 10 micrones de diámetro.	kg PM10-Eq
Formación de oxidantes fotoquímicos	La formación de ozono a nivel del suelo de la troposfera, debida a la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles y de CO en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar. Son nocivas para la vegetación y las vías respiratorias.	kg NMVOC
Acidificación terrestre	Las emisiones de NOx , NH3 y SOx dan lugar a la liberación de iones de hidrógeno H+ cuando los gases se mineralizan. Los protones contribuyen a la acidificación del suelo.	kg SO2-Eq
Ecotoxicidad terrestre	Se refiere a las sustancias tales como metales pesados y los efectos que pueden tener sobre el ecosistema. Los potenciales de eutrofización están expresados en un área de ecosistema terrestre y la eutrofización es un consecuencia de las emisiones.	kg 1,4-DCB-Eq
Ocupación de tierras urbanas	El uso de una superficie de suelo urbano por otras actividades. Considera los efectos del uso de la tierra, la extensión de la superficie implicada y la duración de su ocupación.	m <sup>2</sup> a
Agotamiento del agua	Se refiere al uso de agua. La sensibilización hacia el agotamiento del recurso agua, ha llevado al desarrollo del concepto Huella Hídrica.	m <sup>3</sup>

Para efectos del estudio, se genera un mayor énfasis en las categorías del cambio climático, agotamiento de fósiles, agotamiento de recursos minerales, toxicidad humana, y agotamiento de la capa de Ozono.

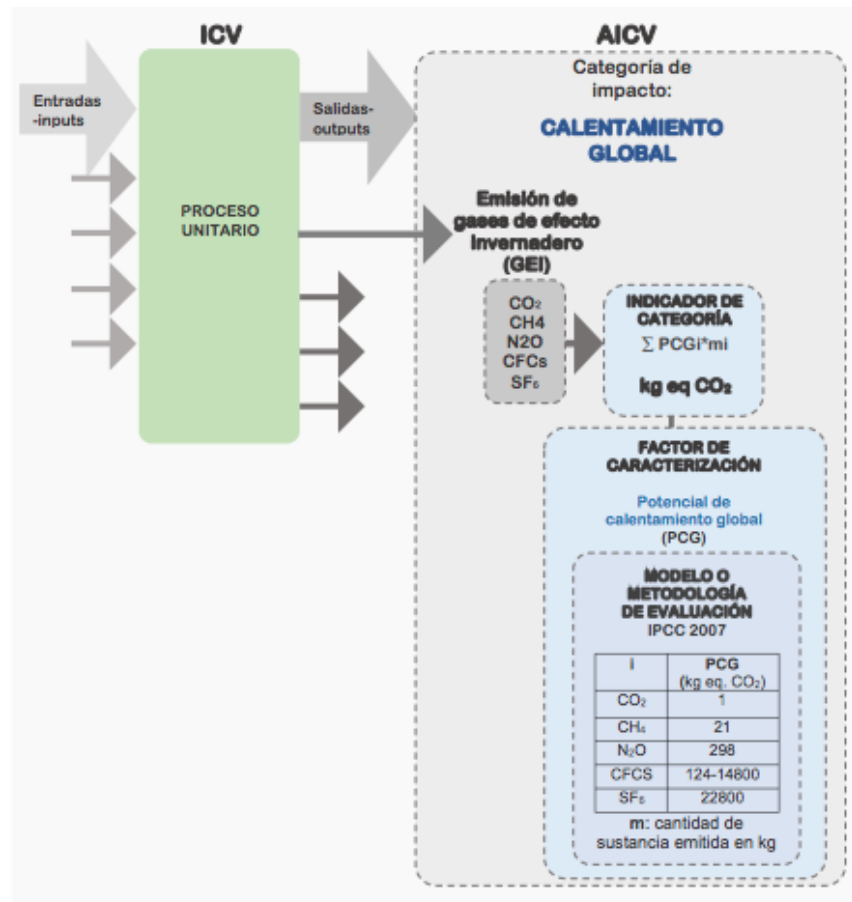
### 3.3.3.2 Selección de indicadores de impacto

Una vez que se asigna la categoría de impacto, se utilizan los indicadores de categoría. Siguiendo el ejemplo de la tabla anterior, el potencial de calentamiento global es la categoría de impacto y, como indicador de categoría, está el kilogramo equivalente de dióxido de carbono (Kg eq de CO<sub>2</sub>), que es la unidad en la cual se va a medir el impacto.

### 3.3.3.3 Caracterización

La caracterización es el cálculo o cuantificación de la contribución potencial de cada compuesto a una categoría de impacto. Esto implica la conversión de los resultados del ICV las mismas unidades y la suma de los resultados convertidos dentro de la misma categoría de impacto. Esta conversión utiliza factores de caracterización que vienen definidos por el modelo utilizado y la salida del cálculo es el resultado numérico de un indicador.

Lo mencionado anteriormente queda esquematizado en la figura 3.4:



**Figura 3.4.** Esquema de clasificación y caracterización mediante un ejemplo para la categoría de calentamiento global con método de evaluación IPCC 2007 (Fuente: Vallejo, 2004).

### 3.3.4 Interpretación de resultados

Según la norma UNE-EN ISO 14044 (2006), en esta última etapa de un ACV se combina la información obtenida en la fase de inventario y evaluación del impacto para llegar a identificar las variables significativas teniendo en cuenta los análisis de sensibilidad

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

realizados. Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones de acuerdo con los objetivos y el alcance del estudio.

### **3.4 Software para el ACV**

Actualmente, existe una variedad de software que están disponibles para realizar un ACV; SimaPro, GABI, UMBERTO, TEAM, EVERDEE 2.0, OpenLCA, entre otros. Estas herramientas tienen como componentes principales y prioritarios la presencia y variedad de bases de datos y metodologías de evaluación.

Es recomendable que cuenten con un periodo regular de actualización, pues los avances tecnológicos provocan un envejecimiento prematuro de la validez de los datos existentes. También, es conveniente que el software pueda trabajar con varias metodologías de evaluación de impacto de ciclo de vida (Ihobe, 2009).

#### **3.4.1 OpenLCA**

Consiste en un software gratuito y de código abierto líder en el mundo para la realización de análisis de sustentabilidad y ciclo de vida, desarrollado por la empresa alemana GreenDelta y se encuentra disponible desde el año 2007.

Entre las características de OpenLCA, se destacan:

- Cálculo rápido, objetivo y confiable para la implementación de evaluación de sostenibilidad y/o del ciclo de vida.
- Información detallada sobre los resultados de cálculos y análisis al identificar los principales impulsores a lo largo del ciclo de vida, por proceso, flujo o categoría de impacto.
- Posee la capacidad de importación y exportación de los proyectos.
- Fácil de usar, interfaz de usuario en una variedad de idiomas.
- Mejora continua e implementación de nuevas características.
- Ofrece la mayor colección de conjuntos de datos y bases de datos en todo el mundo para softwares de ACV, algunos para comprar y otros de forma gratuita, en total, están disponibles casi 100.000 conjuntos de datos diferentes.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

### 3.5 Base de datos para el ACV

Es de mucha importancia dentro del estudio ya que la validez de este dependerá de la calidad de los datos utilizados en el inventario de ciclo de vida. Se utilizan principalmente las bases de datos dispuestas por OpenLCA Nexus, que son de acceso gratuito y cuentan con los impactos asociados a los materiales o insumos a utilizar durante el estudio. En la tabla 3.2 se especifican las diversas fuentes de datos:

*Tabla 3.2. Bases de datos importadas para realización del estudio (Fuente: Elaboración propia).*

Base de datos	Fuente
IMPACT worl +	Mundial
Environmental Footprints	Europa
The Evah Institute	Australia
Exiobase	Mundial
NEEDS	Europa
ELCD	Europa
BioEnergiedat	Alemania
Agribalyse	Francia

## **4 Metodología**

La metodología propuesta para el cumplimiento de los objetivos se detalla a continuación.

### **4.1 Modelo de planta desalinizadora**

Se desarrolla un modelo de la planta desalinizadora de Minera Candelaria con la finalidad de cuantificar los impactos ambientales asociados a la operación de esta. Para la realización de este modelo es necesaria una gran cantidad de datos, que se obtienen de la siguiente manera:

- En primer lugar, a partir del informe consolidado de la evaluación del estudio de impacto ambiental del proyecto “Planta Desalinizadora de Minera Candelaria” se obtienen directamente la mayoría de los tipos de insumos y emisiones que son utilizados o producidas en la construcción y operación de la planta. También, se encuentran en este documento las cantidades respectivas utilizadas o producidas.
- En segundo lugar, existen algunos insumos (químicos principalmente) que se mencionan en el documento expuesto anteriormente y son importantes dentro del proceso, pero no se especifica la cantidad utilizada. Esta es calculada según volumen de producción de la planta y un proceso de estequiometría, lo cual queda representado anexo 1.
- En tercer lugar, la información asociada al consumo energético de las diversas etapas dentro de la planta es obtenida de una memoria que estudia precisamente el tema energético de una planta desalinizadora por osmosis inversa y es adaptado a la producción real de este caso. En cuanto a la electricidad necesaria para el transporte del agua hacia faena o comunidad, se calcula matemáticamente de acuerdo con las ecuaciones expresadas en el apartado de antecedentes, la cual considera factores como aceleración de gravedad, densidad del fluido, caudal, diámetro de tubería y altura de impulsión, etc. Algunos de estos valores son obtenidos directamente del EIA de la planta desalinizadora, otros a partir de un benchmarking realizado a plantas desalinizadoras con condiciones similares y finalmente la altitud de los puntos de interés se obtienen a partir de una aproximación mediante la herramienta Google

Earth. Los cálculos asociados a lo expresado en este apartado pueden verse en el anexo 4.

## 4.2 Escenarios

### 4.2.1 Definición de escenarios

Durante el desarrollo de este trabajo se van a considerar seis escenarios, que se diferencian por el tipo de energía eléctrica utilizada y la vida útil de la planta, esto con la finalidad de evaluar cual es la fuente o combinación energética que tiene menos impactos ambientales:

- Escenario 1:

*Tabla 4.1. Descripción escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).*

Construcción planta	2011-2012
Vida útil planta	18 años (Hasta 2030)
Operación	2013-2020
Matriz energética	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cada año utiliza una representación de la matriz energética nacional (SIC/SING o SEN) según corresponde.</li></ul>

- Escenario 2:

*Tabla 4.2. Descripción escenario 2 (Fuente: Elaboración propia).*

Construcción planta	2011-2012
Vida útil planta	38 años (Hasta 2050)
Operación	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2013-2050</li><li>• Swap vs convencional</li></ul>
Matriz energética	<ul style="list-style-type: none"><li>• De 2011-2020 se utiliza una representación de la matriz energética nacional (SIC/SING o SEN)</li></ul>

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

	según corresponde el año y de 2021 a 2050 se utiliza por extensión la matriz SEN 2020.
--	--

- Escenario 3:

**Tabla 4.3.** Descripción escenario 3 (Fuente: Elaboración propia).

Construcción planta	2011-2012
Vida útil planta	38 años (Hasta 2050)
Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2013-2050</li> <li>• Swap vs convencional</li> </ul>
Matriz energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De 2011 a 2020 utiliza una representación de la matriz energética nacional (SIC/SING o SEN) según corresponde por año.</li> <li>• De 2021 a 2035 se utiliza la matriz energética de 2020.</li> <li>• De 2036 a 2050 se utiliza una exageración de la energía solar según la relación 70% solar-30% convencional 2020.</li> </ul>

- Escenario 4:

**Tabla 4.4.** Descripción escenario 4 (Fuente: Elaboración propia).

Construcción planta	2011-2012
Vida útil planta	38 años (Hasta 2050)
Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2013-2050</li> <li>• Swap vs convencional</li> </ul>
Matriz energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De 2011 a 2020 utiliza una representación de la matriz energética nacional (SIC/SING o SEN) según corresponde por año.</li> </ul>

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De 2021 a 2035 se utiliza la matriz energética de 2020.</li> <li>• De 2036 a 2050 se utiliza una exageración de la energía solar según la relación 80% solar-20% convencional 2020.</li> </ul>
--	---

- Escenario 5:

**Tabla 4.5.** Descripción escenario 5 (Fuente: Elaboración propia).

Construcción planta	2011-2012
Vida útil planta	38 años (Hasta 2050)
Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2013-2050</li> <li>• Swap vs convencional</li> </ul>
Matriz energética	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De 2011 a 2020 utiliza una representación de la matriz energética nacional (SIC/SING o SEN) según corresponde por año.</li> <li>• De 2021 a 2035 se utiliza la matriz energética de 2020.</li> <li>• De 2036 a 2050 se utiliza una exageración de la energía solar según la relación 80% solar-20% eólica.</li> </ul>

- Escenario 6:

**Tabla 4.6.** Descripción escenario 6 (Fuente: Elaboración propia).

Construcción planta	2011-2012
Vida útil planta	38 años (Hasta 2050)
Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2013-2050</li> <li>• Swap vs convencional</li> </ul>

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Matriz energética	<ul style="list-style-type: none"><li>• De 2011 a 2020 se utiliza una representación de la matriz energética nacional (SIC/SING o SEN) según corresponde.</li><li>• De 2021 a 2050 se utiliza una proyección realizada por el ministerio de energía para dichos años.</li></ul>
-------------------	---

#### 4.2.2 Simulación de escenarios

Se realiza la simulación de los diversos escenarios en el software computacional OpenLCA, para esto es necesario:

- Crear en el software matrices eléctricas para cada año que representen la generación de 1 [kWh] de energía convencional en Chile. Para esto es necesaria la utilización de la información de la generación eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) desde el 2011 al 2020, a partir de esta, es posible calcular el porcentaje de aporte de cada fuente energética y el software lo multiplica por la cantidad de energía necesaria por cada etapa para el funcionamiento del proceso de desalinización en la planta (anexo 2).
- Se crean matrices eléctricas para cada año que representen la generación de 1 [kWh] de energía convencional en Chile de acuerdo con la Planificación Energética de Largo Plazo (PELP) realizada por el Ministerio de Energía de Chile en 2020. En esta planificación se mencionan 5 escenarios energéticos proyectados para la matriz eléctrica nacional hasta 2052 y de estos escenarios, se representa el A. Con esta información se puede calcular el porcentaje de cada fuente energética para cada año y así representar en el software solo tiene que ponderarlo por la cantidad de energía necesaria, al igual que en caso anterior (anexo 2).

### **4.3 Realización del ACV**

Comprende el cumplimiento de cada una de las etapas que componen la metodología de aplicación de un ACV, detalladas anteriormente pero con diversas especificaciones aplicadas a este caso.

#### **4.3.1 Objetivos y alcance**

Se definen los objetivos y límites del sistema de estudio, incluyendo los casos o escenarios propuestos. Además, se establece la unidad funcional de trabajo, junto con la metodología de evaluación ambiental y fuentes de información empleadas y debidamente justificadas.

#### **4.3.2 Análisis de inventario:**

Corresponde a la recopilación de los datos utilizados en los flujos de entrada y salida del sistema, esto es básicamente introducir los datos obtenidos de las etapas 4.1 y 4.2 en el software computacional OpenLCA (ver anexo 5). Por otra parte, es necesario descargar e importar bases de datos complementarias que tienen integrado los procesos productivos y el impacto asociado a cierto tipo de materiales o insumos utilizados en el proyecto de la planta desalinizadora. Este enfoque no solo analiza las emisiones de carbono generadas directamente por el proceso de desalinización, también considera los efectos indirectos, lo que vendrían siendo las emisiones generadas por los proveedores dentro de toda la cadena de suministro.

#### **4.3.3 Evaluación de impacto ambiental:**

Se evalúa el nivel de criticidad asociado a los resultados del análisis de inventario, vale decir, cargas ambientales y riesgos asociados. Para esto es necesario:

- Simular los impactos ambientales asociados al inventario representado en el software.
- Se evalúan los diversos escenarios detallados anteriormente.

#### **4.3.4 Interpretación de resultados:**

Parte final del ACV, se utiliza toda la información obtenida por las etapas previas para:

- Graficar los distintos resultados obtenidos.
- Comparar los resultados de los distintos casos de estudio.
- Concluir a partir de los resultados y realizar recomendaciones en base a las diferencias o distinciones propias de cada caso.

## 5 Caso de estudio

Se utiliza como referencia el caso de la planta desalinizadora de Minera Candelaria de Lundin Mining.

### 5.1 Localización

El proyecto se localiza en la Región de Atacama, en las Comunas de Caldera y Copiapó, pertenecientes a la Provincia de Copiapó.

La planta desalinizadora y la infraestructura asociada a la captación de agua de mar y descarga de agua salada se localizarán aledañas a las instalaciones del Puerto Punta Padrones de Compañía Contractual Minera Candelaria, aproximadamente a 3 km al sur de la Ciudad de Caldera, Comuna de Caldera, Provincia de Copiapó. A su vez, esta ubicada a más de 100 km de la faena minera. Lo mencionado anteriormente se refleja en la figura 5.2.

### 5.2 Descripción

Su construcción comienza en agosto de 2011, luego de la aprobación del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y consideró además una línea de transmisión eléctrica y un acueducto de 100 kilómetros de extensión, que conecta a la planta desalinizadora con las operaciones de Candelaria.

Su puesta en marcha dicta de 2013, donde se convirtió en la primera instalación de este tipo que se construye y entra en operaciones en Atacama.

En la tabla 5.1 se exponen los criterios de diseño generales de operación de la planta desalinizadora.

*Tabla 5.1. Parámetros generales planta desalinizadora (Fuente: EIA Planta Desalinizadora Minera Candelaria, 2011).*

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal captación	1155	l/s
Caudal agua desalinizada	500	l/s
Caudal descarga agua salada	655	l/s
Eficiencia del sistema de desalinización	43.3	%

A continuación se detallan las diversas etapas del proceso de desalinización con su respectivo cálculo energético:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

### 5.2.1 Captación de agua de mar

Se capta el agua de mar a través de un cajón de captación que no debería superar los 0.3 [m/s] como velocidad máxima.

**Tabla 5.2.** Estación de bombeo etapa de captación (Fuente: Mena, 2016).

Características	Datos
Tipo	TORISHIMA.
Fabricante	Horizontal Axially Split Double-Suction Pump
Modelo	CDM 450x350 JN, 50 Hz, 4 Polos
Potencia unitaria	450 kW
Cantidad bombas	2
Tiempo trabajo	100 %
Potencia total	900 kW

A partir de estos datos técnicos se modela su consumo energético:

**Tabla 5.3.** Consumo energético etapa captación agua de mar (Fuente: Elaboración propia).

	Valor	Unidad
Consumo energético diario	21600	kWh
Consumo energético anual	7884	MWh
Consumo energético específico	0.5	kWh/m <sup>3</sup>

### 5.2.2 Pretratamiento

Esta etapa tiene como objetivo eliminar los sólidos en suspensión mediante cribas de separación, inyección de productos químicos y sistema de filtrado. Además, como se menciona en los alcances, considerará dentro de sí, la limpieza de membranas y limpieza de filtros.

Dentro de la etapa de pretratamiento, se consideran las siguientes subetapas con sus respectivos datos técnicos:

**Tabla 5.4.** Compresor AquaDAF, pretratamiento (Fuente: Mena, 2016).

Características	
Fabricante	AquaDAF
Tipo	Dissolved Air Flotation High-Rate Clarifier
Modelo	AquaDAF Clarifier
Cantidad	5

Compresor	15 kW (70% tiempo)
Bomba circulación	37 kW (100% tiempo)
Bomba floculación	2.5 kW (100% tiempo)
Bomba coagulación	0.5 kW (100% tiempo)
Bomba lodos	0.5 kW (50% tiempo)
Skimmer lodos	5 kW (50%)
Potencia total	266.25 kW

**Tabla 5.5.** Bombas de circulación, pretratamiento (Fuente: Mena, 2016).

Características	
Fabricante	TORISHIMA
Tipo	Horizontal Axially Split Double-Suction Pump
Modelo	CDM 500x450 MN, 50 Hz, 6 Polos
Potencia unitaria	75 kW (100% tiempo)
Cantidad	4
Potencia total	300 kW

**Tabla 5.6.** Bomba retrolavado, pretratamiento (Fuente: Mena, 2016).

Características	
Fabricante	TORISHIMA
Tipo	Horizontal Axially Split Double-Suction Pump
Modelo	CDM 350 LN, 50 Hz, 6 Polos
Potencia unitaria	30 kW (25% tiempo)
Cantidad	1
Potencia total	7.5 kW

A partir de estos datos técnicos se modela su consumo energético:

**Tabla 5.7.** Consumo energético etapa pretratamiento (Fuente: Elaboración propia).

	Valor	Unidad
Consumo energético diario	13770	kWh
Consumo energético anual	5026	MWh
Consumo energético específico	0.319	kWh/m <sup>3</sup>

### 5.2.3 Osmosis inversa

Sistema que tiene como objetivo reducir las sales del agua de mar proveniente del pretratamiento, generando agua desalinizada. El proceso se realiza mediante el paso de fluido

sometido a una alta presión (800 - 850 psi) a través de trenes de membranas de osmosis inversa, donde se separan la mayor parte de las sales.

Por otra parte, el sistema contempla dispositivos de recuperación de energía para aprovechar la alta presión del flujo de agua salada de descarga o rechazo y de esta manera disminuir el consumo neto de energía del sistema.

**Tabla 5.8.** Bomba de alta presión en sistema de osmosis inversa (Fuente: Mena, 2016).

Características	
Tipo	TORISHIMA
Fabricante	Horizontal/twin-suction/axially split multi-stage
Modelo	MSH 300/2
Potencia unitaria	2050 kW
Cantidad bombas	2
Potencia total	4100 kW

**Tabla 5.9.** Bomba potenciadora en sistema de osmosis inversa (Fuente: Mena, 2016).

Características	
Tipo	TORISHIMA
Fabricante	Horizontal Axially Split Double-Suction Pump
Modelo	CDM 250x150 BN, 50 Hz, 4 polos
Potencia unitaria	250 kW
Cantidad bombas	4
Potencia total	1000 kW

A partir de estos datos técnicos se modela el consumo energético:

**Tabla 5.10.** Consumo energético etapa de osmosis inversa (Fuente: Elaboración propia).

	Valor	Unidad
Consumo energético diario	122400	kWh
Consumo energético anual	44676	MWh
Consumo energético específico	2.83	kWh/m <sup>3</sup>

#### 5.2.4 Tanque de almacenamiento con bomba tanque

Los 43200 m<sup>3</sup>/día producidos por la planta desalinizadora de Minera Candelaria son almacenados en un tanque de acero de 6000 m<sup>3</sup> aproximadamente. Su finalidad consiste en la acumulación del agua para ser enviada al sistema de bombeo, además se realizan muestreos del agua desalinizada de forma diaria para evaluar su calidad.

**Tabla 5.11.** Bomba tanque de almacenamiento (Fuente: Mena, 2016).

Características	
Tipo	TORISHIMA
Fabricante	Horizontal Axially Split Double-Suction Pump
Modelo	CDM 400x350 KB, 50 Hz, 6 Polos
Potencia unitaria	45 kW
Cantidad bombas	2
Potencia total	90 kW

**Tabla 5.12.** Consumo energético tanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia).

	Valor	Unidad
Consumo energético diario	2160	kWh
Consumo energético anual	788	MWh
Consumo energético específico	0.05	kWh/m <sup>3</sup>

### 5.2.5 Sistema de impulsión para transporte de agua desalinizada

Para la impulsión del agua desalinizada con calidad industrial se proyecta la instalación de un sistema de bombeo, ubicado dentro de las instalaciones de la Planta Desalinizadora, el cual estará constituido por bombas centrifugas multietapas. Este sistema contempla la unión de dos acueductos, en primera instancia, se transporta el agua por un acueducto desde la planta desalinizadora hasta el sector bodega, posteriormente, se lleva el agua por un segundo acueducto, desde el sector bodega a las operaciones de Minera Candelaria. Esto queda representado en la tabla 5.13:

**Tabla 5.13.** Acueductos involucrados en el transporte de agua desalinizada (Fuente: Elaboración propia).

Tramo	Proyecto	Procedencia	Destino	Distancia
1	Acueducto	Planta desalinizadora (Caldera)	Sector bodega (Copiapo)	80 km
2	Acueducto Chamonate-Candelaria	Sector bodega (Copiapo)	Minera Candelaria (Tierra Amarilla)	29.5 km

De forma gráfica esto queda representado en la figura 5.1:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”



**Figura 5.1.** Representación del sistema de transporte del agua desalinizada caso no swap (Fuente: Elaboración propia).

A partir de esta figura, es importante mencionar que las rectas representan el destino de los acueductos y no su recorrido real.

La electricidad necesaria para transportar el agua desalinizada desde la planta desalinizadora hasta la faena, se obtiene de acuerdo a cálculos matemáticos especificados en el anexo 4, donde se obtienen los resultados representados en la tabla 5.14:

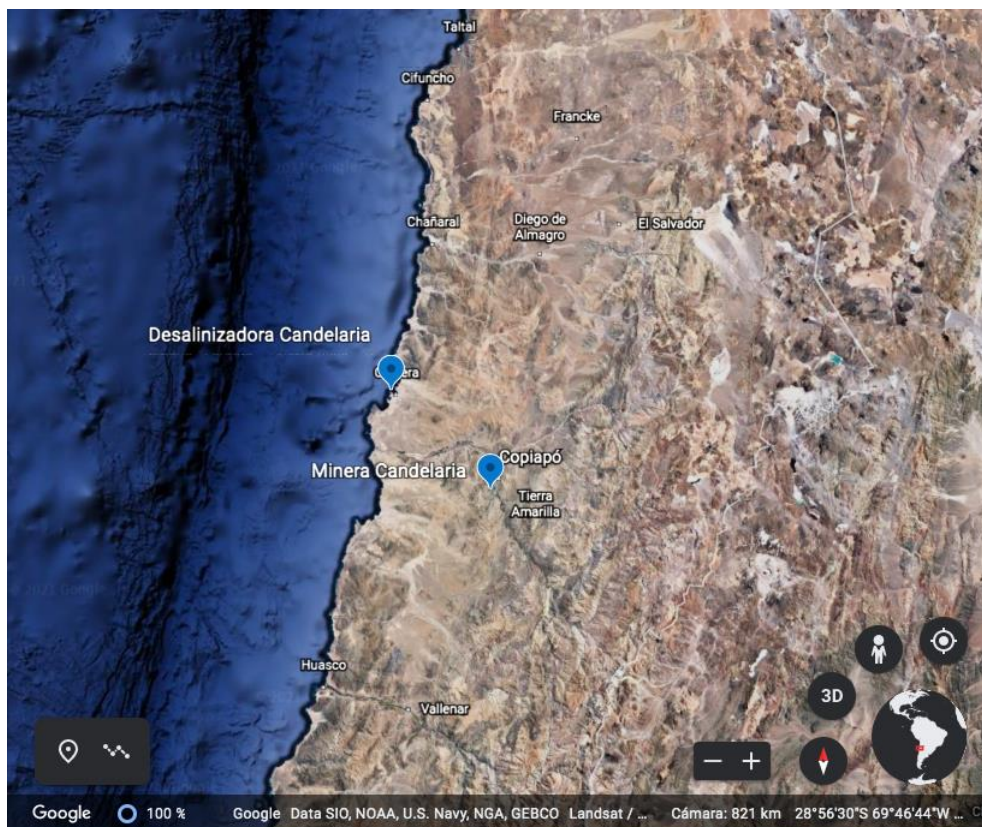
**Tabla 5.14.** Consumo energético transporte agua desalinizada a faena (Fuente: Elaboración propia).

	Tramo 1	Tramo 2	Unidad
Consumo energético diario	74256	68184	kWh
Consumo energético anual	27103	24887	MWh
Consumo energético específico	1.71	1.58	kWh/m <sup>3</sup>

### 5.3 Comunidades cercanas

Se estudia la realización de un intercambio o “Swapping” con las comunidades que comparten lugar junto a la faena minera. Este concepto hace referencia a que la planta desalinizadora pueda repartir el agua desalinizada a las comunas aledañas en vez de ocuparla directamente en la operación minera. Esto es debido al alto costo asociado al transporte del agua hacia las mineras, normalmente ubicadas a largas distancias y elevadas alturas. Dicho esto, es necesario contextualizar geográficamente a la Planta Desalinizadora de Minera Candelaria, ubicada en las cercanías de Caldera, Chañaral, Copiapó, Diego de Almagro, El Salad, Freirina, Huasco, Inca de Oro, Tierra Amarilla, Vallenar, todas ellas de la III Región, lo cual se puede observar en la figura 5.2:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”



*Figura 5.2. Localización de la zona de estudio (Fuente: Google Earth, 2021).*

Para efectos de este estudio, al simular el “Swapping” dentro del proyecto, se considera como destino final del agua desalinizada la planta de osmosis inversa Placilla Sierralta, que es uno de los principales puntos de distribución de agua potable urbana en la región y esta ubicada en la comuna de Copiapó. Para que esto sea factible, es necesaria la implementación de un acueducto que permita el transporte del agua, el cual es estimado en el anexo 3.

### 5.3.1 Transporte agua desalinizada a comunidad

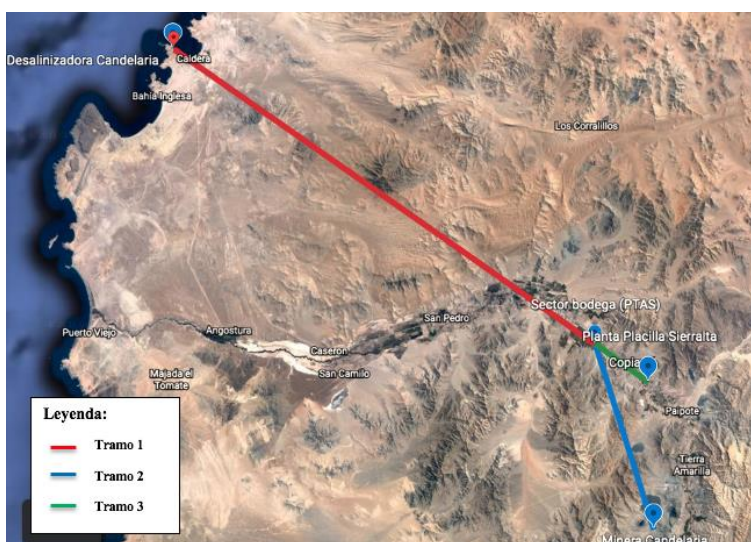
Para llevar a cabo el “Swapping” se requiere de una nueva distribución de los 500 [l/s] de agua desalinizada de la planta, donde 330 [l/s] tienen como destino final la faena minera y 170 [l/s] la planta Placilla Sierralta en la comuna de Copiapó. Los 500 [l/s] producidos por la Planta Desalinizadora de Minera Candelaria son transportados hasta la zona bodega en lo que se llamará “tramo 1”, es ahí donde se separan los caudales de acuerdo al destino, los 330 [l/s] son llevados por el Acueducto Chamonate-Candelaria, en lo que se conocerá como “tramo 2” hasta la faena minera y finalmente, los 170 [l/s] restantes viajarán hasta el punto de interés en la comuna de Copiapó por un Nuevo acueducto hipotético, calculado en base a la distancia en línea recta entre los puntos (anexo 4), en lo que se conocerá como “tramo 3”. Lo mencionado anteriormente queda reflejado en la tabla 5.15:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

**Tabla 5.15.** Distribución de agua desalinizada en modelo swap (Fuente: Elaboración propia).

Tramo	Proyecto	Procedencia	Destino	Distancia	Caudal
1	Acueducto	Planta desalinizadora (Caldera)	Sector bodega (Copiapo)	80 km	500 l/s
2	Acueducto Chamonate-Candelaria	Sector bodega (Copiapo)	Minera Candelaria (Tierra Amarilla)	29.5 km	330 l/s
3	Nuevo acueducto	Sector bodega (Copiapó)	Planta Placilla Sierralta (Nueva Atacama)	7.2 km	170 l/s

El esquema propuesto para este caso de estudio queda representado gráficamente en la figura 5.3:



**Figura 5.3.** Representación del sistema de transporte del agua desalinizada caso swap (Fuente: Elaboración propia).

A partir de esta figura y al igual que en el caso no swap, es importante mencionar que las rectas representan el destino de los acueductos y no su recorrido real. Por otra parte, los tramos 1 y 2 existen actualmente, mientras que el tramo 3 corresponde a un Nuevo Acueducto hipotético, calculado en base a la distancia en línea recta entre los puntos (anexo 4).

La electricidad necesaria para transportar el agua desalinizada a los diversos destinos es calculada en anexo 4 y queda representado en la tabla 5.16:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

**Tabla 5.16.** Consumo energético transporte de agua desalinizada swap (Fuente: Elaboración propia).

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Unidad
Consumo energético diario	74256	45000	4512	kWh
Consumo energético anual	27103	16425	1646	MWh
Consumo energético específico	1.71	1.04	0.10	kWh/m <sup>3</sup>

## **6 Desarrollo de ACV y resultados**

### **6.1 Alcances y unidad funcional del ACV**

#### **6.1.1 Alcance del sistema**

El alcance del sistema conlleva todas las etapas correspondientes al proyecto de planta desalinizadora en sus fases de construcción y operación según se especifica en su EIA, es decir, este estudio no considera la fase de cierre.

##### **6.1.1.1 Fase de construcción**

- 1) La duración de la fase de construcción del proyecto es de 24 meses y se lleva a cabo durante los años 2011 y 2012.
- 2) Para poder llevar a cabo la simulación en software computacional, y a falta de una información más específica, se considera que se lleva a cabo un 50% el primer año y el 50% restante el segundo año.
- 3) Considera los materiales utilizados en la construcción de toda la infraestructura del proyecto según especificación del EIA: Área Planta Desalinizadora, Área acueducto y Área Línea Eléctrica.
- 4) No considera la manufactura de los equipos utilizados en la construcción (camiones, buldócer, compactadora, compresores, retroexcavadoras, bombas, etc).
- 5) No se consideran en el estudio los viajes realizados durante la construcción, ya sea para transporte de insumos o personal.
- 6) Conformación de inventario:
  - Las matrices eléctricas simuladas en software para la construcción no consideran la fuente energética a partir de Biomasa, esto debido a su ausencia en la base de datos utilizada.
  - La información sobre la generación energética dispuesta por el SEN es muy específica, algunas de ellas no se encuentran en la base de datos del software. Es por esto por lo que realizan las siguientes consideraciones para conformar las matrices eléctricas en la construcción:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

- Energía a partir de gas natural= Gas natural + Gas natural licuado (GNL)
  - Energía a partir de petróleo = Petróleo diésel + Fuel oil + (petróleo diésel + fuel oil)
  - Energía a partir de carbón = Carbón + (carbón + petcoke) + petcoke
- 
- El concreto es informado en unidad de volumen por el EIA y el software es compatible con la unidad de masa. Dicho esto, se utiliza una densidad del concreto de 2200 kg/m<sup>3</sup>.
  - El revestimiento es informado en unidad de área por el EIA y el software es compatible con la unidad de masa. Dicho esto, se realiza la conversión a partir de catálogo de geomembrana de HDPE que indica que 2173.1 [m<sup>2</sup>] tiene un peso aproximado de 2 toneladas.
  - Las tuberías de acero son informadas en unidad de distancia por el EIA y el software es compatible con la unidad de masa. Dicho esto, se realiza la conversión a partir de catálogo técnico de Centralpiping donde se considera una tubería de espesor de paredes de 10.31 [mm] (promedio) y una masa de 152.37 kg/m.
  - Las tuberías de HDPE son informadas en unidad de distancia por el EIA y el software es compatible con la unidad de masa. Dicho esto, se realiza la conversión a partir de catálogo técnico de empresa Tigre Chile donde se considera, en primer lugar, una tubería de 36" de diámetro nominal y 24,5 [mm] de espesor con una masa de 60.53 kg/m y, en segundo lugar, una tubería de 24" de diámetro nominal y 19.30 [mm] de espesor con una masa de 37,54 kg/m.
  - Las aguas (potable, industrial o servidas) consumida o producidas durante la construcción es informada en unidad de volumen por el EIA y el software es compatible con la unidad de masa. Dicho esto, y a falta de más información, se utiliza una densidad de aguas de 1000 kg/m<sup>3</sup>.
  - Se considera que todas las excavaciones son realizadas por un solo tipo de equipo: excavadora hidráulica. Esto debido al alcance de la base de datos.

#### 6.1.1.2 Fase de operación

- 1) El inventario generado representa a un año de operación de la planta desalinizadora.
- 2) De acuerdo con el EIA, el proyecto no considera emisiones de material particulado y gases a la atmósfera durante su operación.
- 3) No considera los elementos propios de la planta y su manufactura (bombas centrífugas, etc.).
- 4) No se consideran los viajes realizados durante la operación, ya sea para transporte de insumos, personal o residuos.
- 5) El agua salada de descarga cumple el D.S. 90/01, la cual establece la calidad de los efluentes descargados a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral. Para efectos de este estudio, se considera el peor de los casos posibles, es decir, la salmuera contiene el máximo de efluentes permitidos.
- 6) No considera consumo eléctrico en la descarga de la salmuera al océano, esta se realiza de forma gravitacional por lo que no es considerado dentro del modelo de la planta.
- 7) La información del EIA del proyecto entrega la información sobre los residuos domésticos, peligrosos, no peligrosos y las arenas generadas de forma general, es decir, no se hace distinción por etapa del proyecto. A falta de más información al respecto, se considera que se generan en igual cantidad para las etapas de mayor flujo: captación, pretratamiento y osmosis inversa.
- 8) Para efectos del estudio se considera que en su totalidad la salmuera se genera en la etapa de osmosis inversa.
- 9) Las etapas de retrolavado de filtros y limpieza de membranas, explicadas detalladamente en el EIA, son consideradas dentro de la etapa de pretratamiento para efectos del estudio.
- 10) El proceso por simular durante este estudio queda definido según los diagramas representados en las figuras 6.1 y 6.2:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

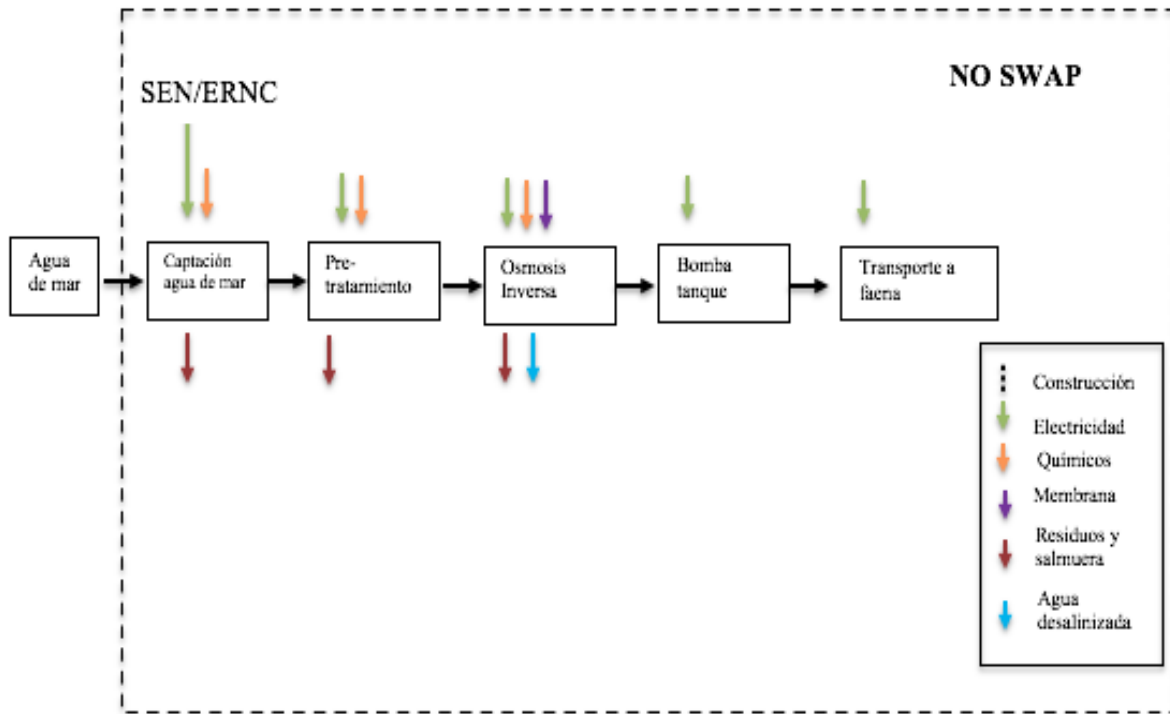


Figura 6.1. Diagrama de flujo proceso de desalinización no swap (Fuente: Elaboración propia).

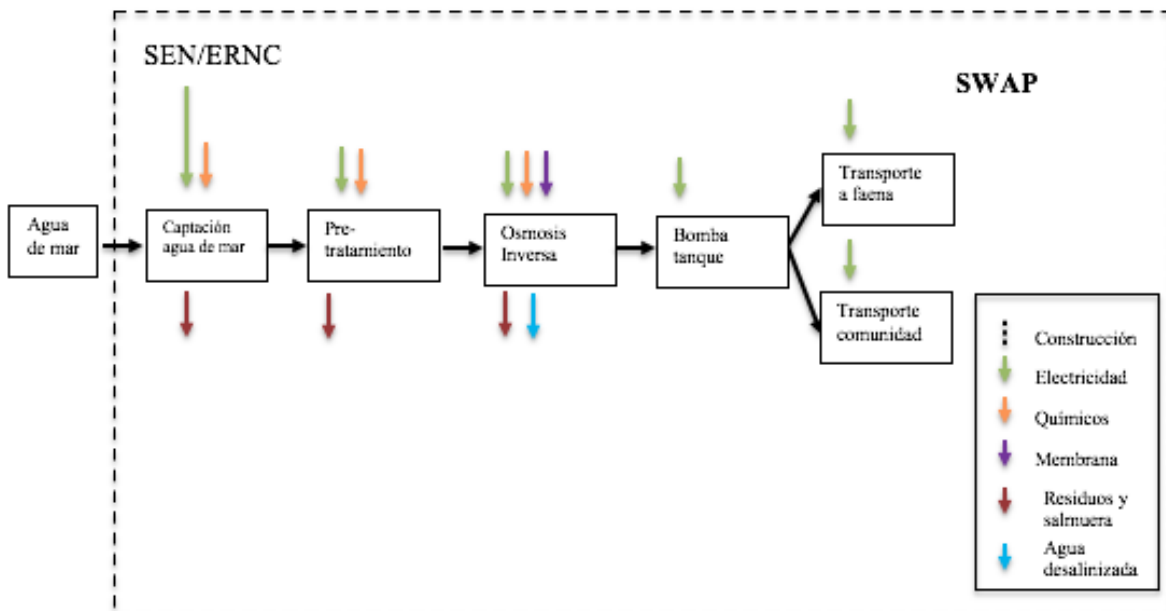


Figura 6.2. Diagrama de flujo proceso de desalinización swap (Fuente: Elaboración propia).

11) Para este estudio, la única diferencia estos dos casos es que el “swap” lleva agua desalinizada hacia la faena (330 l/s) y una comunidad cercana (170 l/s), mientras que el “no swap” transporta toda el agua (500 l/s) para su uso en las operaciones mineras. A falta de más información, se considera como único insumo en el transporte del agua desalinizada la energía eléctrica necesaria para esto.

12) Conformación del inventario:

- La matriz eléctrica simulada en software para años 2013 al 2020 no considera la fuente energética a partir de Biomasa, esto debido a su ausencia en la base de datos utilizada.
- La matriz eléctrica simulada en software según proyección para los años 2021 a 2050 no considera la fuente energética por almacenamiento, esto debido a su ausencia en la base de datos utilizada.
- La información sobre la generación energética dispuesta por el SEN es muy específica, algunas de ellas no se encuentran en la base de datos del software. Es por esto por lo que realizan las siguientes consideraciones para conformar las matrices eléctricas en la operación:
  - Energía a partir de gas natural= Gas natural + Gas natural licuado (GNL)
  - Energía a partir de petróleo = Petróleo diésel + Fuel oil + (petróleo diésel + fuel oil)
  - Energía a partir de carbón = Carbón + (carbón + petcoke) + petcoke
- El agua de mar por desalinizar es informada en unidad de volumen por el EIA y el software es compatible con la unidad de masa. Dicho esto, se utiliza una densidad de agua de mar de 1027 kg/m<sup>3</sup>.
- Las aguas servidas generadas son informadas en unidad de volumen por el EIA y el software es compatible con la unidad de masa. Dicho esto, y a falta de más información, se utiliza una densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

### 6.1.1.3 Transporte del agua desalinizada

La potencia y energía necesaria para el transporte del agua desalinizada es calculada en base a la información y fórmulas mencionadas en apartado de antecedentes 2.5. Para esto, se necesita de ciertos parámetros técnicos mencionados en la tabla a continuación:

**Tabla 6.1.** *Parámetros técnicos transporte de agua desalinizada (Fuente: Elaboración propia).*

Parámetro	Valor	Unidad
Aceleración de gravedad	9.81	m/s <sup>2</sup>
Diámetro acueducto	610	mm
Densidad agua desalinizada	0.9983	ton/m <sup>3</sup>
Velocidad media flujo	1.52	m/s
Viscosidad cinemática agua desalinizada	1.141	m <sup>2</sup> /s*10 <sup>-6</sup>
Rugosidad tubería	0.05	mm
Caudal instantáneo	500	l/s
Caudal horario	1800	m <sup>3</sup> /s
Eficiencia	85	%

Es importante mencionar que, en su totalidad, la tabla esta compuesta por información del EIA de la planta desalinizadora y una revisión bibliográfica en base a estudios similares.

### 6.1.2 Unidad funcional

La unidad funcional para este estudio, y que se utiliza casi siempre en estudios de este tipo, es 1 [m<sup>3</sup>] de agua desalinizada disponible para consumo, esto debido a que considera los impactos asociados al transporte del insumo hacia su destino.

## 6.2 Análisis de inventario

Durante este capítulo se reportan los datos utilizados dentro del ACV para cada configuración, factores de emisión, fuentes de información y los principales supuestos considerados.

- Fase de construcción:

En la siguiente tabla, se presentan los principales insumos utilizados en la construcción de las diversas áreas del proyecto:

**Tabla 6.2.** Inputs asociados a la construcción del proyecto planta desalinizadora (Fuente: EIA Proyecto Planta Desalinizadora Minera Candelaria, 2011).

Insumo	Unidad	Planta desalinizadora	Acueducto	Línea eléctrica
Tubería HDPE	[km]	1	8	-
Tubería Acero-Carbono	[km]	-	72	-
Hormigón	[m <sup>3</sup> ]	3100	2400	4000
Acero	[ton]	820	160	-
Revestimiento de piscina	[m <sup>2</sup> ]	-	17000	-
Agua industrial	[m <sup>3</sup> /día]	40		10
Agua potable	[l/s]	1		
Energía eléctrica	[MW]	0.5		
Tierra usada	[ha]	5	40	55
Excavación	[m <sup>3</sup> ]	528600		

**Tabla 6.3.** Inputs asociados a la construcción del proyecto acueducto Chamonate-Candelaria (Fuente: Ficha del proyecto Chamonate-Candelaria, 2008).

Insumo	Unidad	Acueducto Chamonate-Candelaria
Tubería Acero-Carbono	[km]	29.5
Tierra usada	[ha]	121.9

**Tabla 6.4.** Outputs resultantes de la etapa de construcción (Fuente: EIA Proyecto Planta Desalinizadora Minera Candelaria, 2011).

Tipo de residuo	Descripción	Valor	Unidad
Emisiones	Óxidos de nitrógeno (NOx)	18	[ton/proyecto]
	Monóxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	9	[ton/proyecto]
	Material particulado MP10	38	[ton/proyecto]
Residuos domésticos	Restos de comida, envases, papeles, EPPs, desechos de artículos de aseo personal, entre otros.	1.3	[ton/día]
Residuos industriales no peligrosos	Residuos de la construcción como restos de madera, restos de hormigón, embalajes de equipos, cables, chatarra, cortes de tuberías, entre otros.	18	[ton/mes]

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Residuos peligrosos	Corresponden a aceites y lubricantes usados, restos de pinturas, envases de solventes y baterías, entre otros.	2	[ton/mes]
Aguas servidas	Sólidos suspendidos, aceites, grasas y coniformes fecales.	124	[m <sup>3</sup> /día]

- Fase de operación:

**Tabla 6.5.** Inputs utilizados en las diferentes etapas del proceso de desalinización (Fuente: Elaboración propia).

Etapas	Insumos	Valor	Unidad	Fuente
Captación agua de mar	Hipoclorito de sodio	1897	[t/año]	Anexo 1
Pretratamiento	Cloruro férrico	81	[t/año]	Anexo 1
	Ácido sulfúrico	185	[t/año]	Anexo 1
	Bisulfito de sodio	341	[t/año]	Anexo 1
Osmosis Inversa	Membranas (Poliamida)	7	[U]	EIA planta desalinizadora
	Anhídrido carbónico (CO <sub>2</sub> )	555	[t/año]	Anexo 1
	Hidróxido de calcio (Cal)	410.3	[t/año]	Bibliografía
Sistema limpieza de Membranas de Osmosis Inversa	Ácido clorhídrico (HCl)	9	[t/año]	EIA planta desalinizadora
	Hidróxido de sodio	3	[t/año]	EIA planta desalinizadora
	EDTA	14	[t/año]	EIA planta desalinizadora
	Lauril Sulfato Sódico	4	[t/año]	EIA planta desalinizadora
	Ácido cítrico	14	[t/año]	EIA planta desalinizadora

**Tabla 6.6.** Outputs resultantes del proceso de desalinización (Fuente: EIA Proyecto Planta Desalinizadora Minera Candelaria, 2011).

Tipo de residuo	Descripción	Valor	Unidad
Residuos domésticos	Bolsas, restos de comida, entre otros.	20	[kg/día]

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Residuos industriales no peligrosos	Embalajes, cables u otros.	3	[ton/mes]
	Filtros osmosis inversa.	1.2	[ton/mes]
	Membranas osmosis inversa	28	[ton/año]
	Arenas	1.3	[ton/día]
Residuos peligrosos	Aceites y lubricantes usados, grasas, baterias y pilas.	1.8	[ton/mes]
Aguas servidas	pH (6-8), sólidos suspendidos, aceites, grasas y coniformes fecales.	0.02	[L/día]
Salmuera	Agua salada con efluentes generados en otras etapas.	655	[L/s]

Como se menciona anteriormente en el apartado 6.1.1.2 de los alcances, se considera que la salmuera generada y descargada al océano cuenta con el máximo de los componentes permisibles para cumplir con el D.S. 90/01, lo cual queda representado en la tabla 6.8:

**Tabla 6.7.** Composición del flujo de descarga al océano (Fuente: EIA Proyecto Planta Desalinizadora Minera Candelaria, 2011).

Compuesto	Cantidad [ppm]	Total año [t]
Aceites y grasas	350	7229.6
Aluminio	10	206.6
Arsenico	0,5	10.3
Cadmio	0,5	10.3
Cianuro	1	20.7
Cobre	3	62.0
Cromo	10	206.6
Estaño	1	20.7
Fluoruro	6	123.9
Hidrocarburos	20	413.1
Manganeso	4	82.6
Molibdeno	0,5	10.3
Niquel	4	82.6
Sólidos suspendidos	700	14459.3
Sulfuros	5	103.3
Zinc	5	103.3
Plomo	1	20.7
SAAM	15	309.8

A partir de toda esta información y datos, sumado a la utilización del software computacional OpenLCA, se procede a la obtención de los resultados.

### 6.3 Evaluación de impacto ambiental

Los resultados se dividen de acuerdo al escenario que se esta evaluando:

- Escenario 1:

En primer lugar, en el gráfico 6.1 se puede observar un panorama general en donde se distingue el aporte porcentual que genera cada una de las etapas involucradas en el proceso de desalinización a cada categoría de impacto.

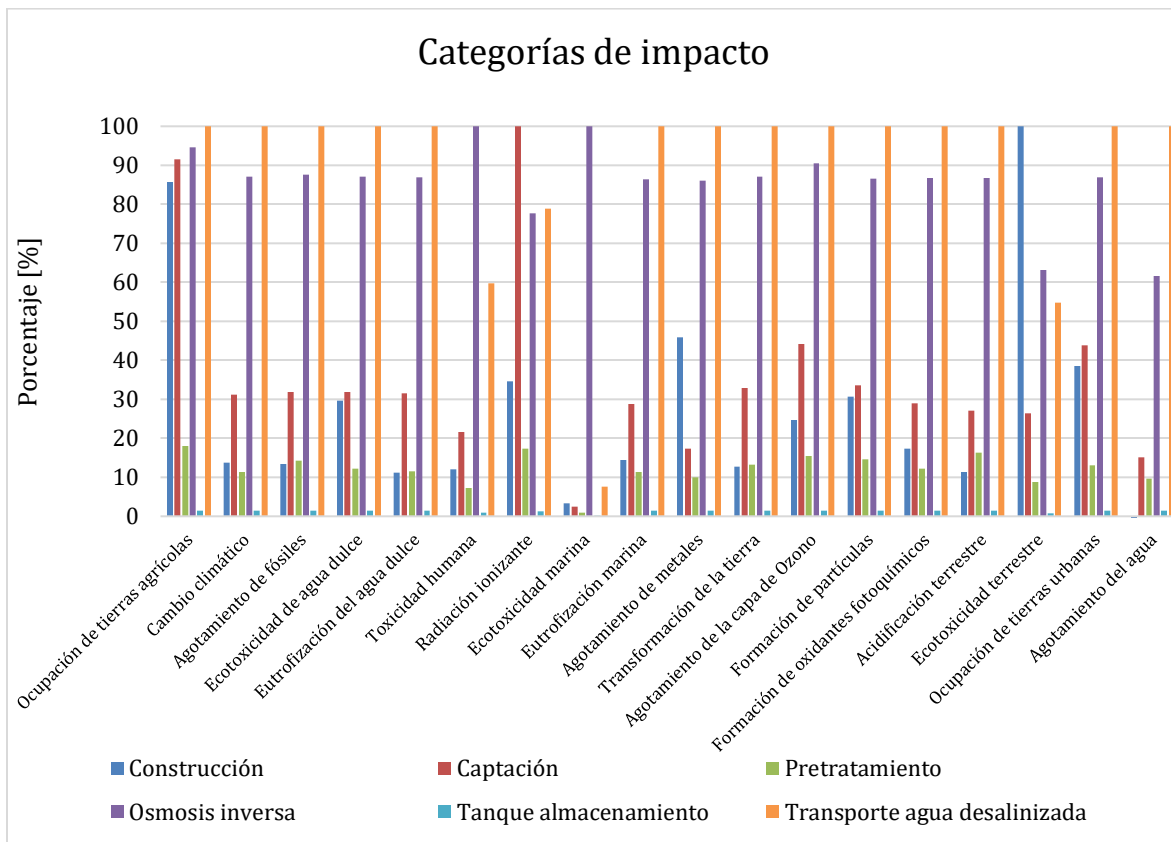
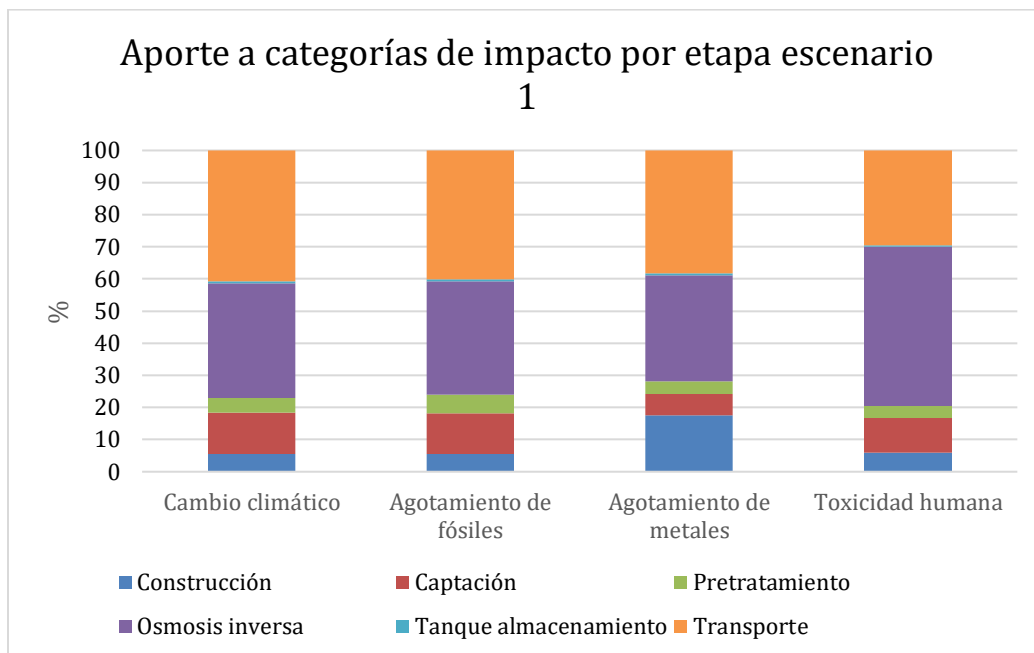


Gráfico 6.1. Categorías de impacto escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).

A partir de este gráfico se puede observar que la etapa de transporte del agua desalinizada es la que genera un mayor impacto, liderando en el 78 % de las categorías. En contra parte, se encuentra el estanque de almacenamiento del agua, etapa donde se produce el menor número

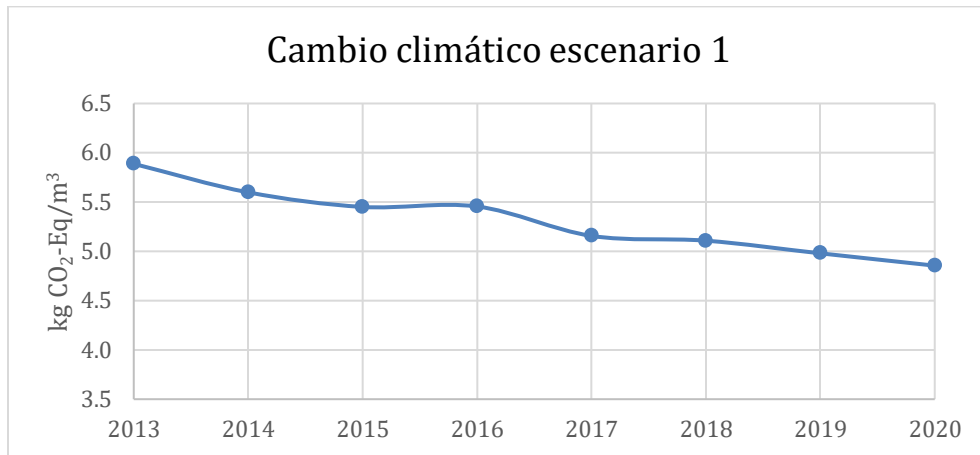
de impactos, es más, su aporte a cualquier categoría de impacto jamás supera el 5%. Esto se puede observar de forma más precisa en el siguiente gráfico, que involucra las categorías de mayor interés:



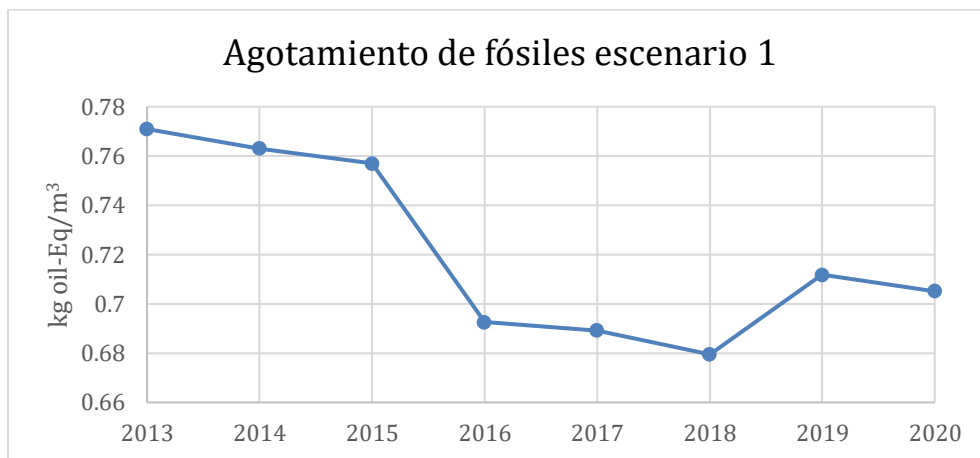
**Gráfico 6.2.** Aporte de distintas etapas en proceso de desalinización escenario 1 (Fuente: elaboración propia).

Los principales aportes vienen dados por el transporte del agua y la etapa de osmosis inversa, el aporte entre ambas alcanza entre el 71% y el 80% de los impactos. Más específicamente, el aporte al cambio climático alcanza los 41% y 36% respectivamente. En contra parte, el tanque de almacenamiento produce impactos casi insignificativos.

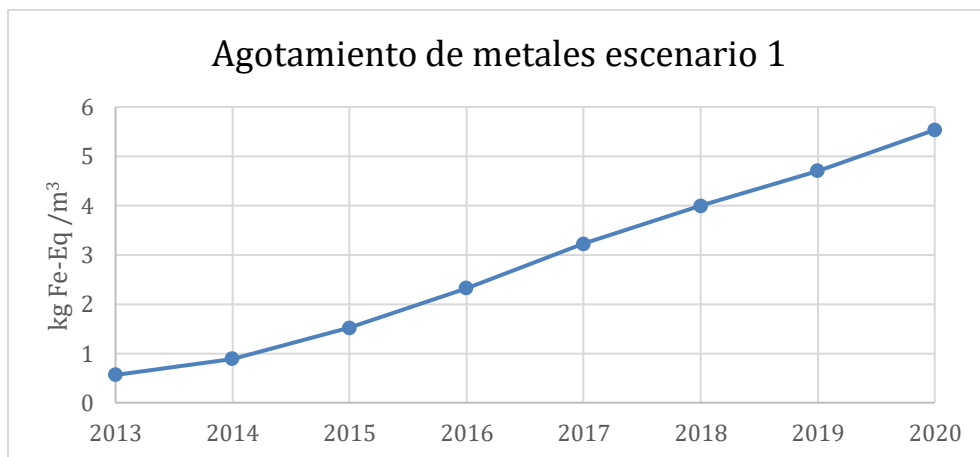
Al analizar las principales cinco categorías de impacto de interés, cambio climático, agotamiento de fósiles, agotamiento de metales, agotamiento de la Capa de Ozono y toxicidad humana, se obtienen los gráficos 6.3 al 6.7 respectivamente, donde se observa la evolución en función del tiempo:



**Gráfico 6.3.** Cambio climático escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).



**Gráfico 6.4.** Agotamiento de fósiles escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).



**Gráfico 6.5.** Agotamiento de metales escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).

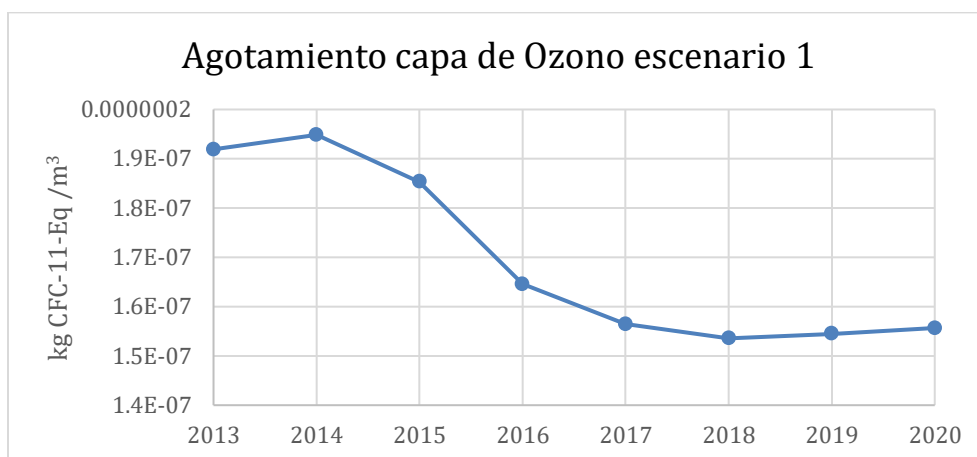


Gráfico 6.6. Agotamiento capa de Ozono escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).

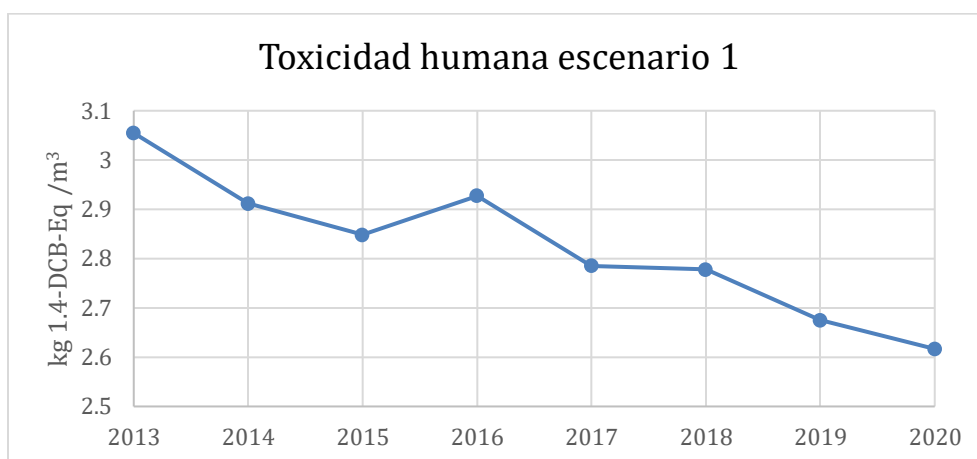


Gráfico 6.7. Toxicidad humana escenario 1 (Fuente: Elaboración propia).

A partir de esto, se puede notar que cuatro de las cinco categorías tienen una clara tendencia a la baja a medida que avanzan los años. El impacto asociado al cambio climático de la planta desalinizadora inicia con 5.88 kg de CO<sub>2</sub>-Eq en 2013 para en 2020 alcanzar los 4.85 CO<sub>2</sub>-Eq, lo que representa una disminución del 18 % en 8 años. La única categoría de impacto que aumenta con el transcurso del tiempo es la del agotamiento de metales, de 0.56 kg de Fe-Eq a 5.54 kg de Fe-Eq. Estos comportamientos están relacionados directamente con el aumento en la cantidad de energías renovables dentro de la matriz eléctrica, con estas fuentes energéticas se generan menos impactos ambientales, pero por otro lado, se produce un aumento en el agotamiento de metales por que estos son materiales son altamente necesarios en su construcción y funcionamiento.

Todo lo mencionado anteriormente es importante ya que el escenario 1 representa lo que ha sido la operación “real” de la planta desde el 2013 al 2020, con la información oficial de la composición de las matrices eléctricas nacionales.

- Escenario 2:

En primer lugar, se analiza el comportamiento del cambio climático, agotamiento de metales y agotamiento de fósiles, en función del tiempo. Esto queda representado en los gráficos desde el 6.8 al 6.10 respectivamente:

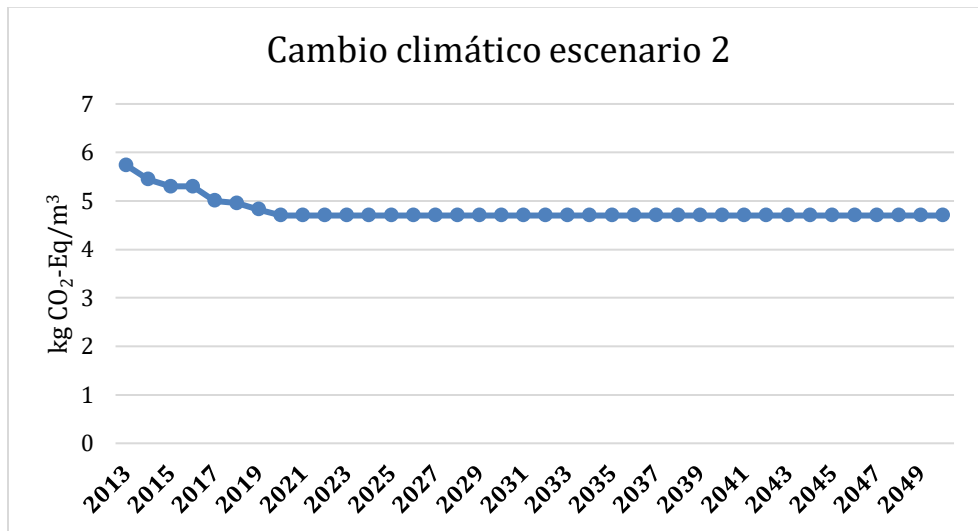


Gráfico 6.8. Variación del impacto al cambio climático del escenario 2 (Fuente: Elaboración propia).

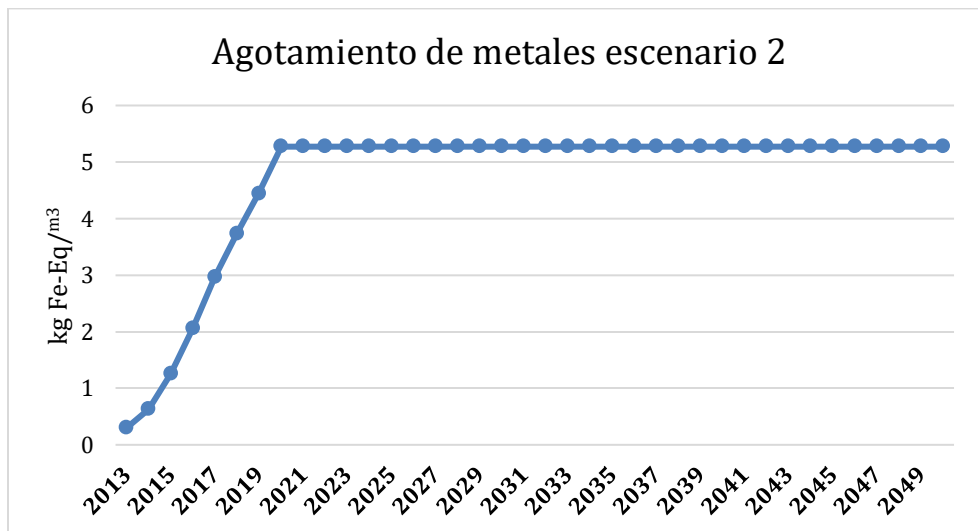
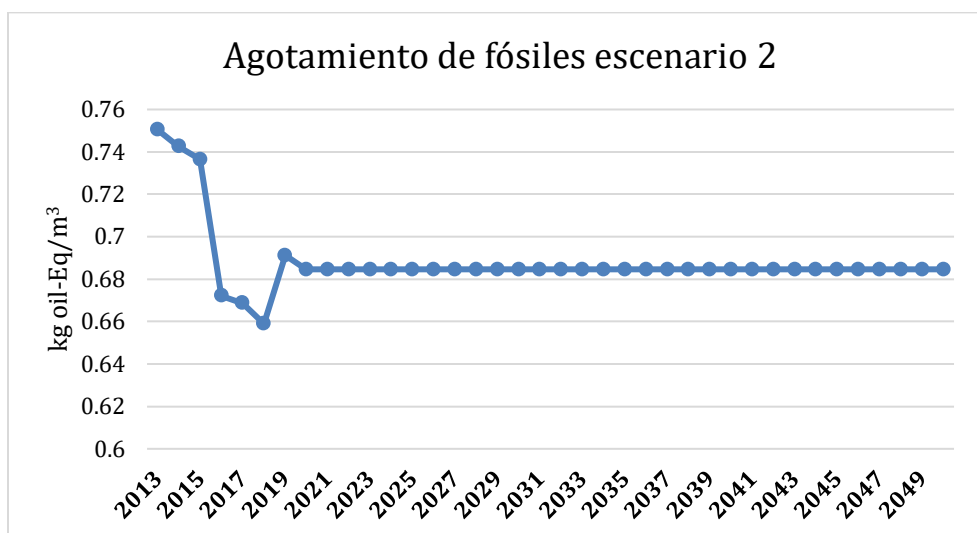


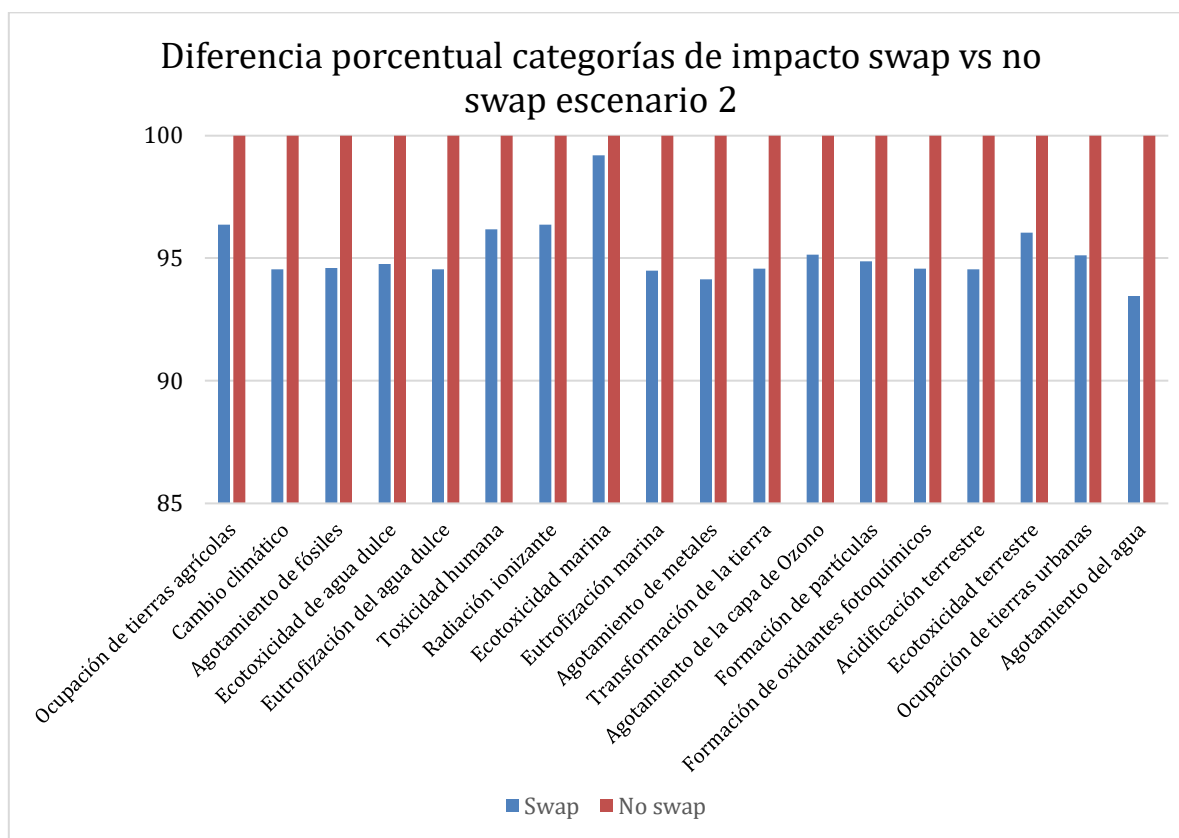
Gráfico 6.9. Variación del agotamiento de metales del escenario 2 (Fuente: Elaboración propia).



**Gráfico 6.10.** Variación del agotamiento de fósiles del escenario 2 (Fuente: Elaboración propia).

Durante los 38 años de estudio, de forma general se obtienen disminuciones tanto para los impactos del cambio climático y agotamiento de fósiles, en contra parte se produce un aumento en el agotamiento de metales. Este caso es simbólico ya que representa los resultados si la matriz eléctrica actual perdurara en el tiempo. Los valores promedios para estos impactos durante este período de tiempo son de 4.794 kg de CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>3</sup>, 0.688 kg oil-Eq/m<sup>3</sup> y 4.71 kg de Fe-Eq/m<sup>3</sup> respectivamente.

Por otra parte, al contrastar todas las categorías de impacto para los casos con swap vs no swap, que se modelan a partir del año 2021, se obtiene el gráfico 6.11:



**Gráfico 6.11.** Diferencia porcentual entre casos swap vs no swap del escenario 2 (Fuente: Elaboración propia).

Y los resultados promedios de las principales categorías de impacto quedan contrastadas en la tabla 6.9 a continuación:

**Tabla 6.8.** Resumen principales categorías de impacto casos swap vs no swap escenario 2 (Fuente: Elaboración propia).

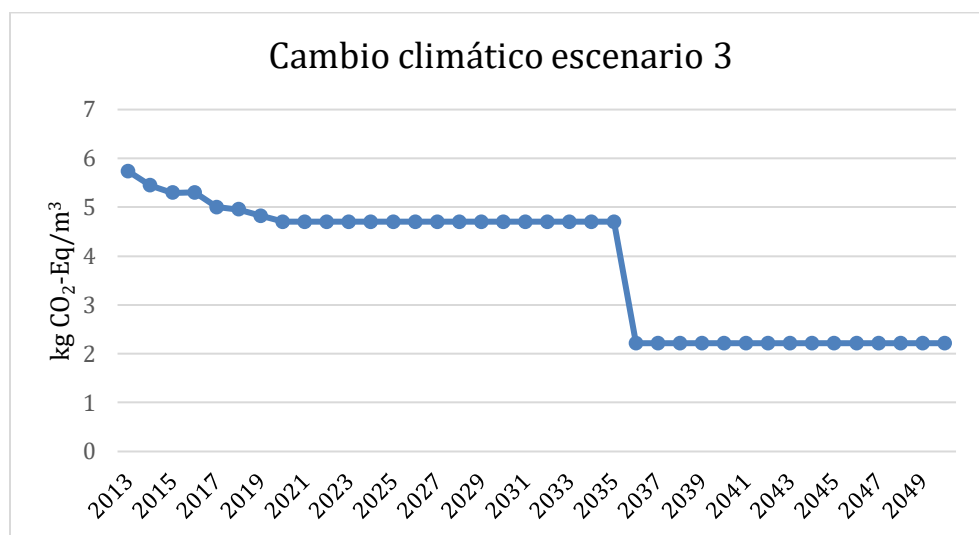
Categoría de impacto	Unidad	No swap	Swap	Dif [%]
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>3</sup>	4.70	4.44	6
Agotamiento de fósiles	kg oil-Eq/m <sup>3</sup>	0.68	0.64	6
Toxicidad humana	kg 1.4-DCB-Eq/m <sup>3</sup>	2.53	2.43	4
Agotamiento de metales	kg Fe-Eq/m <sup>3</sup>	5.27	4.96	6
Agotamiento capa de Ozono	kg CFC-11-Eq/m <sup>3</sup>	1.47E-07	1.40E-07	5

Donde se puede observar que el caso en que se comparte agua desalinizada con las comunidades cercanas tiende a generar menores impactos que el que lleva el 100% del agua hacia la faena. Si bien la diferencias producidas son pocas, alcanzan variaciones para las 18

categorías de impacto que fluctúan entre el 1 y el 7 %, siempre positivas para el caso swap. Esto se debe principalmente a la gran distancia y altitud que requiere ser trasladada el agua si su destino final es solamente la faena minera. En el caso swap, los 170 [l/s] se transportan a la comuna de Copiapó, por lo que se requiere de una menor potencia y por ende menor costo energético.

- Escenario 3:

Al igual que en caso anterior, se comienza por analizar el comportamiento de las categorías del calentamiento global, agotamiento de metales y agotamiento de fósiles en función del tiempo, lo cual queda representado por los gráficos 6.12 a 6.14, respectivamente.



**Gráfico 6.12.** Variación del impacto al cambio climático del escenario 3 (Fuente: Elaboración propia).

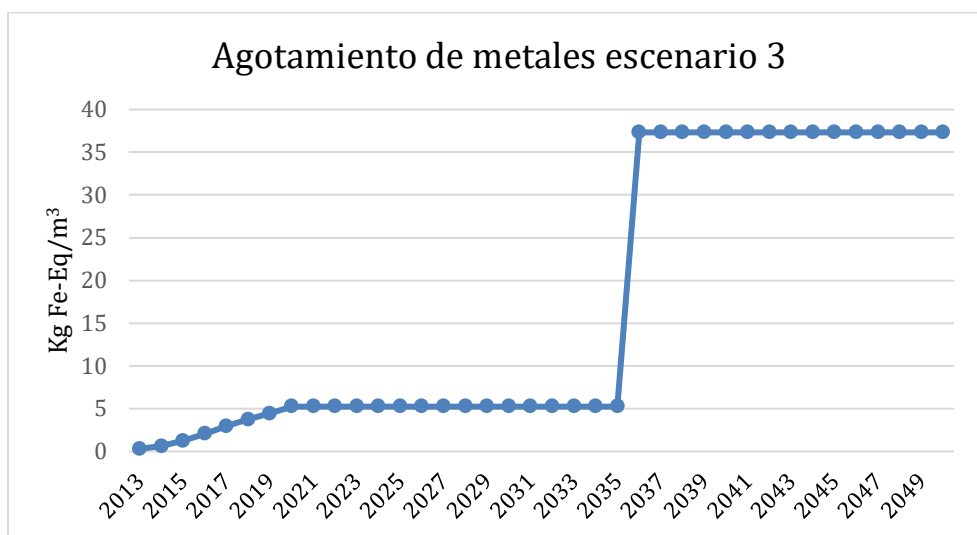


Gráfico 6.13. Variación del agotamiento de metales del escenario 3 (Fuente: Elaboración propia).

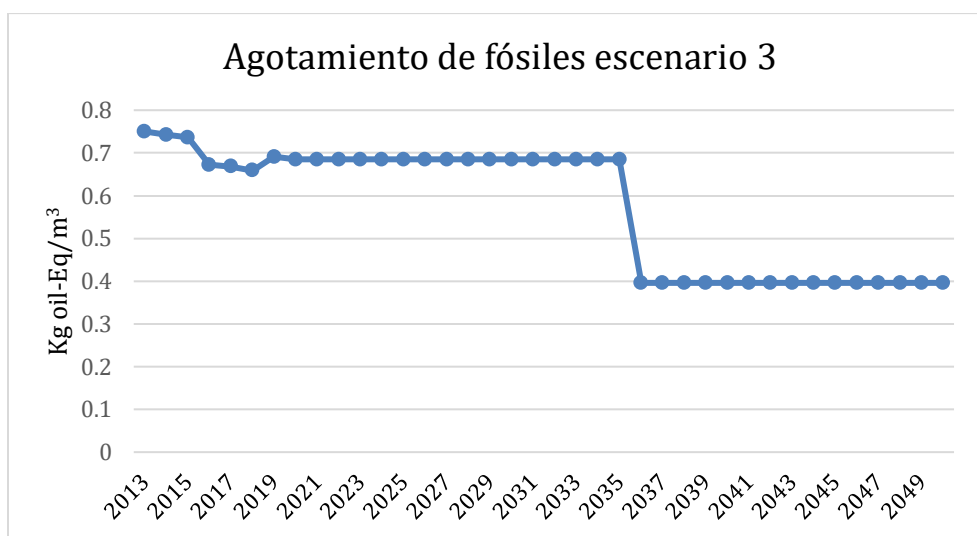
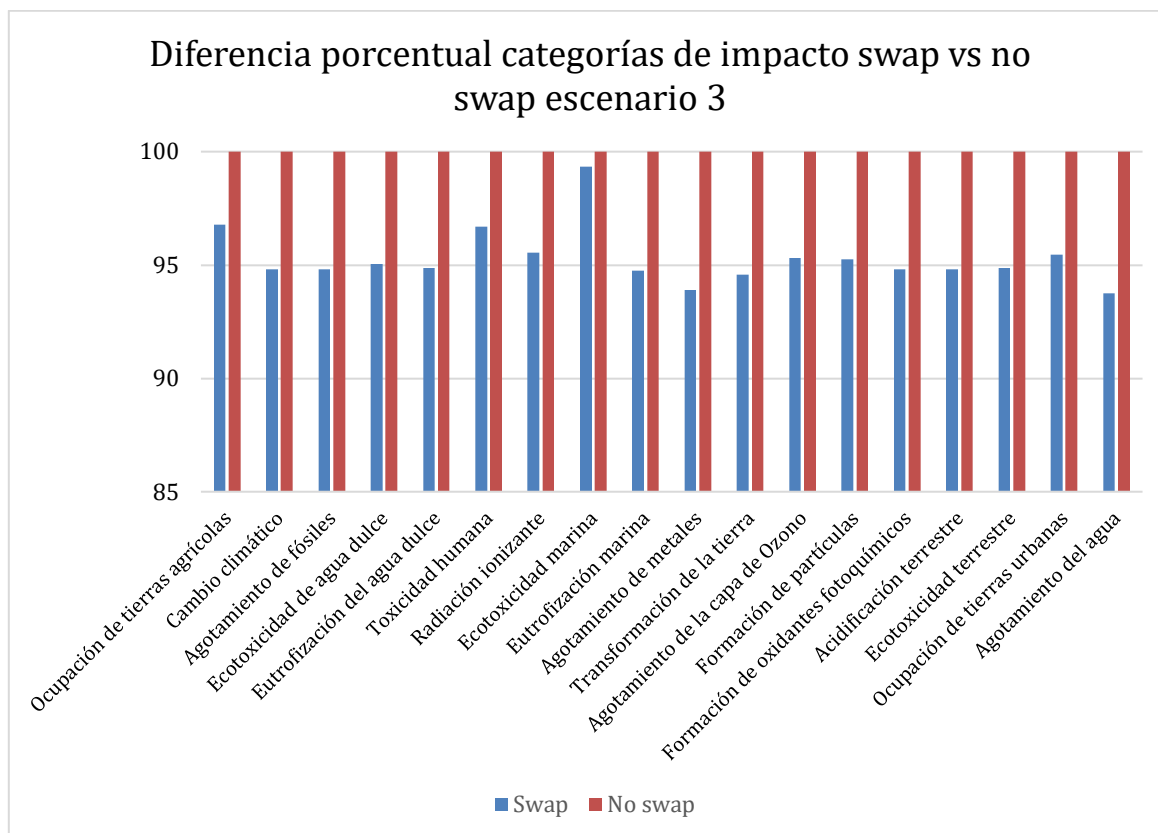


Gráfico 6.14. Variación del agotamiento de fósiles del escenario 3 (Fuente: Elaboración propia).

El 94 % de las categorías de impacto generan disminuciones con el transcurso del tiempo, en los gráficos presentados, se observa como disminuyen los impactos del cambio climático y agotamiento de fósiles, en contra parte se produce un aumento en el agotamiento de metales. Esto se produce debido a que este caso considera una exageración de la energía solar hasta el 70% después del año 2036, esto implica la disminución del uso de energía en base a combustibles fósiles y el aumento de la utilización de metales para la construcción de paneles solares o cualquier infraestructura necesaria para utilizar energía solar. Los valores promedios para estos impactos durante este período de tiempo son de 3.815 kg de CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>3</sup>, 0.574 kg oil-Eq/m<sup>3</sup> y 17.356 kg de Fe-Eq/m<sup>3</sup> respectivamente.

Por otra parte, al comparar todas las categorías para los casos swap vs no swap, que se modelan a partir del año 2021, se obtiene el gráfico 6.15:



**Gráfico 6.15.** Diferencia porcentual entre casos swap vs no swap del escenario 3 (Fuente: Elaboración propia).

Y a modo de resumen, los resultados promedios de las principales categorías de impacto quedan contrastadas en la tabla 6.10:

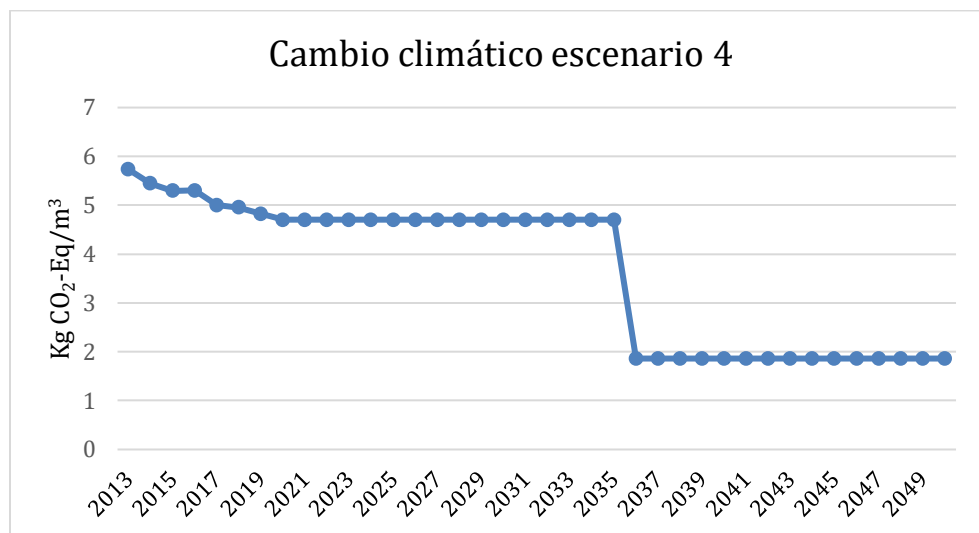
**Tabla 6.9.** Resumen principales categorías de impacto casos swap vs no swap escenario 3 (Fuente: elaboración propia).

Categoría de impacto	Unidad	No swap	Swap	Dif [%]
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>3</sup>	3.458	3.278	5
Agotamiento de fósiles	kg oil-Eq/m <sup>3</sup>	0.540	0.512	5
Toxicidad humana	kg 1.4-DCB-Eq/m <sup>3</sup>	2.067	1.999	3
Agotamiento de metales	kg Fe-Eq/m <sup>3</sup>	21.295	19.997	6
Agotamiento capa de Ozono	kg CFC-11-Eq/m <sup>3</sup>	1.31E-07	1.25E-07	5

Donde se puede observar que el impacto generado por el caso no swap es mayor al del caso no swap en el 100% de las categorías. Las variaciones producidas entre ambos impacto fluctúan entre el 1 y el 7 %, provocadas principalmente por la disminución de la potencia necesaria para el transporte a raíz de transportar 170 [l/s] a comuna de Copiapó en lugar de Tierra Amarilla, que geográficamente esta ubicada a una mayor altitud.

- Escenario 4:

Se comienza por analizar el comportamiento de las categorías del calentamiento global, agotamiento de metales y agotamiento de fósiles en función del tiempo, lo cual queda representado por los gráficos 6.16 a 6.18, respectivamente.



**Gráfico 6.16.** Variación del cambio climático escenario 4 (Fuente: Elaboración propia).

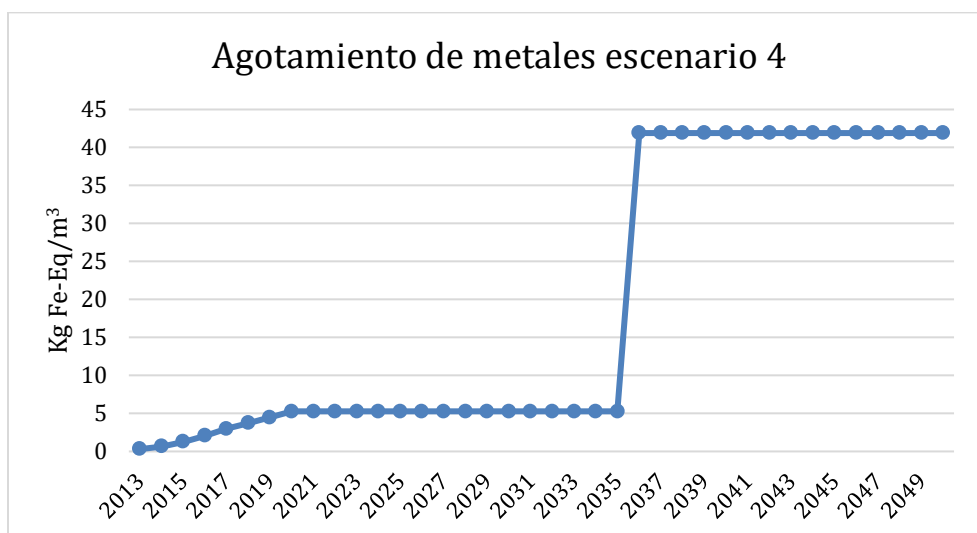


Gráfico 6.17. Variación del agotamiento de metales escenario 4 (Fuente: Elaboración propia).

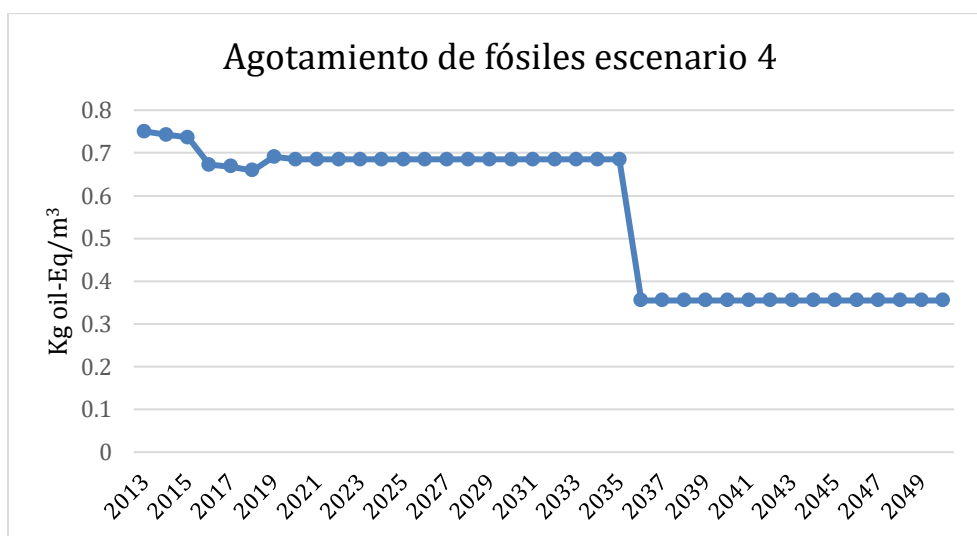
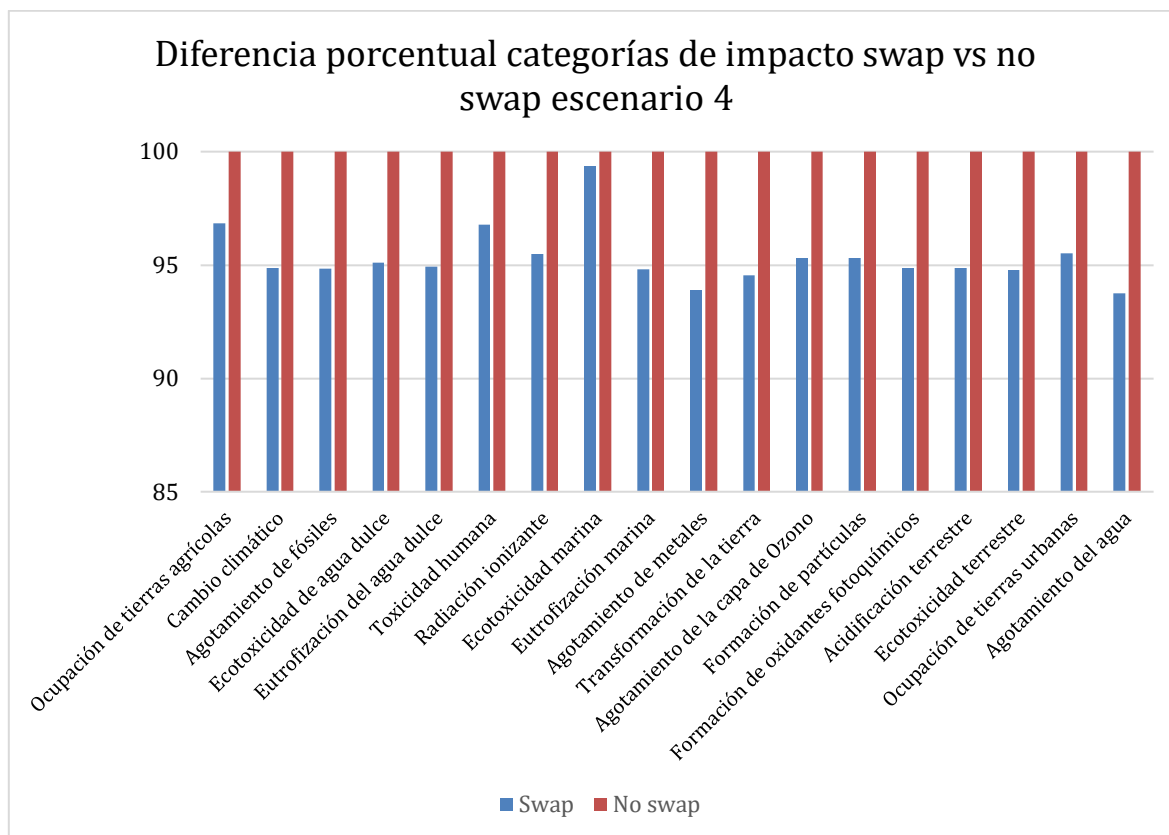


Gráfico 6.18. Variación del agotamiento de fósiles escenario 4 (Fuente: Elaboración propia).

El 94 % de las categorías de impacto generan disminuciones con el transcurso del tiempo, en los gráficos presentados, se observa como disminuyen los impactos del cambio climático y agotamiento de fósiles, en contra parte se produce un aumento en el agotamiento de metales. Esto se produce debido a la exageración de la energía solar en un 80% desde el año 2036 al 2050, el calentamiento global disminuye debido a la disminución de energía en base a carbón, que es la que más aporta a esta categoría, disminuye la utilización de energía en base a combustibles fósiles, disminuyendo esta categoría y finalmente, aumenta el uso de metales para solventar toda la infraestructura asociada a la energía solar. Los valores promedio para estos impactos durante este período de tiempo son de 3.675 kg de CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>3</sup>, 0.558 kg oil-Eq/m<sup>3</sup> y 19.163 kg de Fe-Eq/m<sup>3</sup> respectivamente.

Con respecto a la diferencia entre los casos swap vs no swap, que se modelan a partir del año 2021, se obtiene el siguiente gráfico:



**Gráfico 6.19.** Diferencia porcentual entre casos swap vs no swap del escenario 4 (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados promedio de las principales categorías de impacto quedan contrastadas en la tabla a continuación:

**Tabla 6.10.** Resumen principales categorías de impacto casos swap vs no swap escenario 4 (Fuente: Elaboración propia).

Categoría de impacto	Unidad	No swap	Swap	Dif [%]
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>3</sup>	3.280	3.112	5
Agotamiento de fósiles	kg oil-Eq/m <sup>3</sup>	0.520	0.493	5
Toxicidad humana	kg 1.4-DCB-Eq/m <sup>3</sup>	2.000	1.937	3
Agotamiento de metales	kg Fe-Eq/m <sup>3</sup>	23.585	22.145	7
Agotamiento capa de Ozono	kg CFC-11-Eq/m <sup>3</sup>	1.29E-07	1.23E-07	5

Donde se puede observar que al igual que en los escenarios anteriores, el caso no swap genera un mayor impacto que el swap en el 100% de las categorías. Las variaciones producidas entre ambos impacto fluctúan entre el 1 y el 7 %.

- Escenario 5:

Se comienza por analizar el comportamiento de las categorías del calentamiento global, agotamiento de metales y agotamiento de fósiles en función del tiempo, lo cual queda representado por los gráficos 6.20 a 6.22, respectivamente:

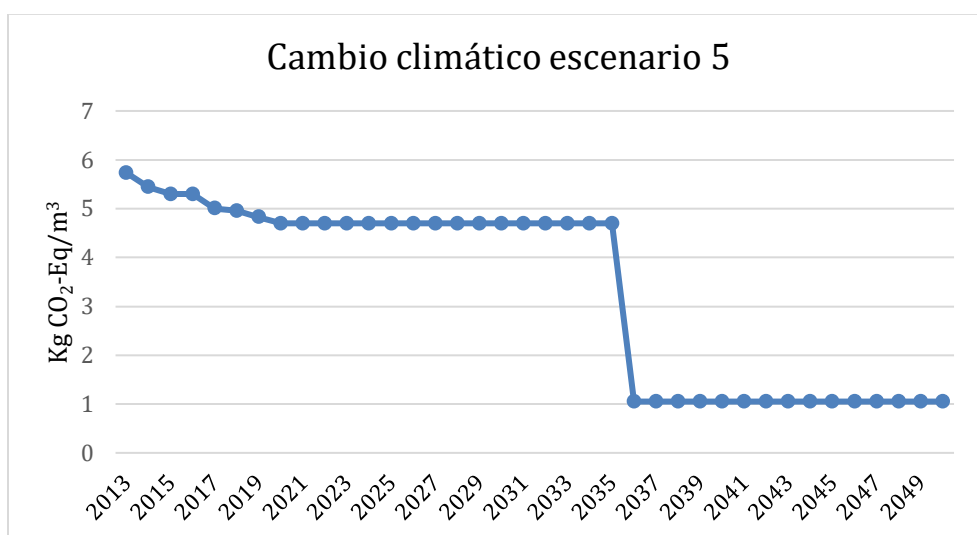


Gráfico 6.20. Variación del cambio climático escenario 5 (Fuente: Elaboración propia).

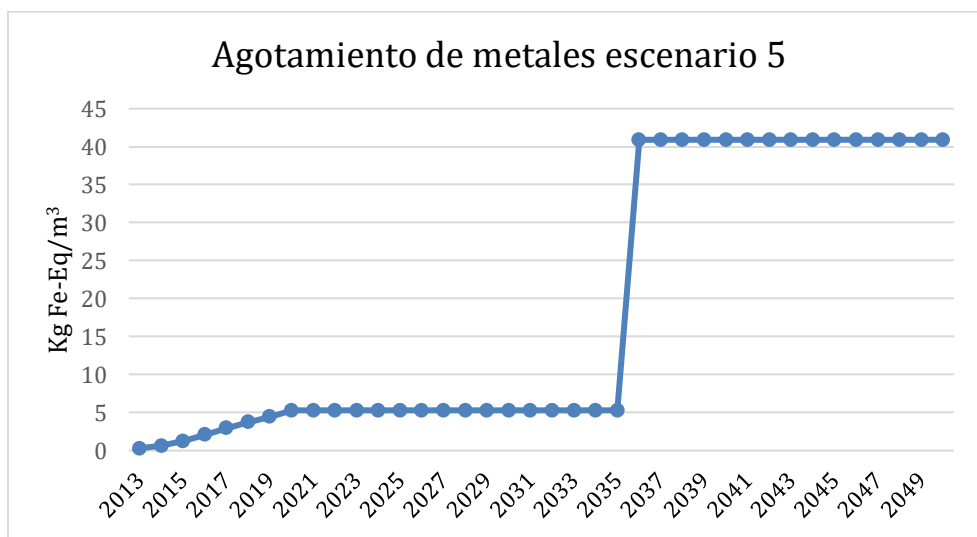
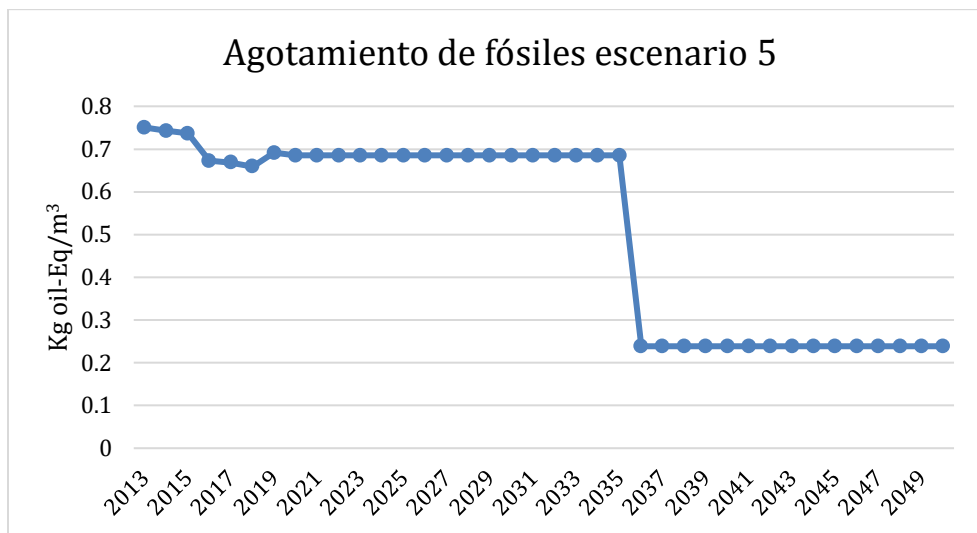


Gráfico 6.21. Variación del agotamiento de metales escenario 5 (Fuente: Elaboración propia).

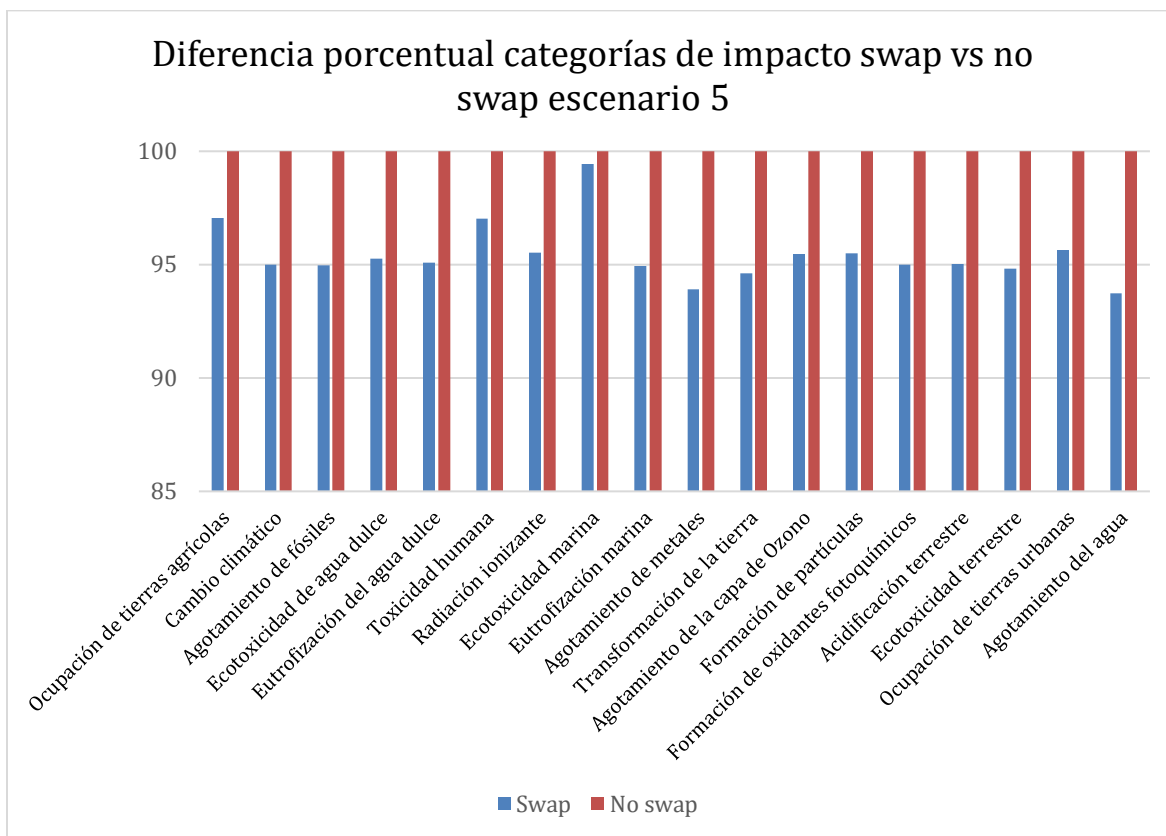


**Gráfico 6.22.** Variación del agotamiento de fósiles escenario 5 (Fuente: Elaboración propia).

A partir de estos, es posible notar que la categoría de agotamiento de metales es la única de las 18 categorías que aumentan con el tiempo. Esto es debido a la exageración de energías renovables, que abastecerán en un 100% todo el funcionamiento de la planta desalinizadora con una distribución de 80% solar y un 20% eólica. Al igual que en casos anteriores, con el aumento de las energías renovables aumenta el consumo de metales, en este caso para la elaboración de tantos paneles solares y molinos de viento se requieran para satisfacer en su totalidad la necesidad energética de la planta. Además, se representan el cambio climático y el agotamiento de fósiles, los cuales tienen una clara tendencia a la baja producto de la disminución de fuentes energéticas en base a carbón, gas natural y petróleo.

Finalmente, los valores promedios para estos impactos durante este período de tiempo son de 18.773 kg de Fe-Eq/m<sup>3</sup>, 3.355 kg de CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>3</sup> y 0.512 kg oil-Eq/m<sup>3</sup> respectivamente.

Con respecto a la diferencia entre los casos swap vs no swap, que se modelan a partir del año 2021, se obtiene el gráfico 6.23, donde se comparan las 18 categorías:



**Gráfico 6.23.** Diferencia porcentual entre casos swap vs no swap del escenario 5 (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados promedio de las principales cinco categorías de impacto quedan contrastadas en la tabla a continuación:

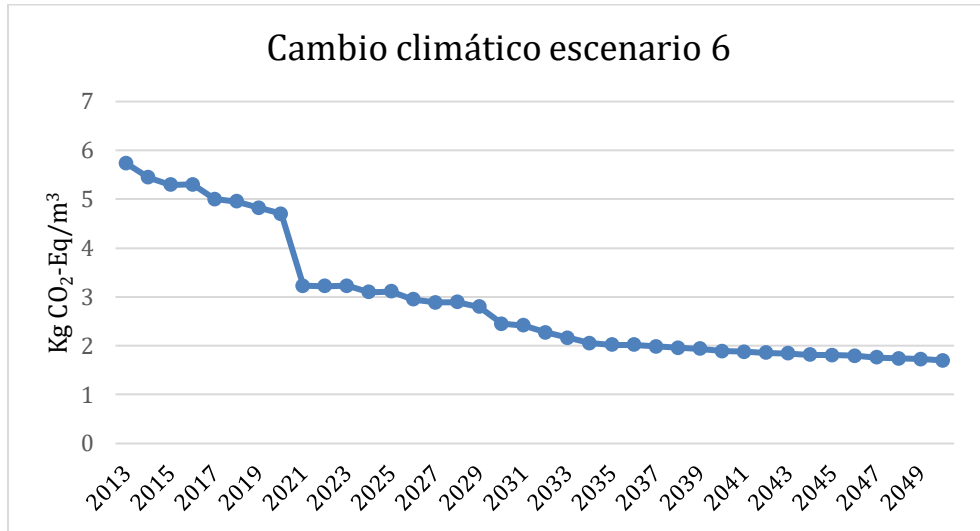
**Tabla 6.11.** Resumen principales categorías de impacto casos swap vs no swap escenario 5 (Fuente: Elaboración propia).

Categoría de impacto	Unidad	No swap	Swap	Dif [%]
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>3</sup>	2.875	2.731	5
Agotamiento de fósiles	kg oil-Eq/m <sup>3</sup>	0.462	0.438	5
Toxicidad humana	kg 1.4-DCB-Eq/m <sup>3</sup>	1.855	1.800	3
Agotamiento de metales	kg Fe-Eq/m <sup>3</sup>	23.091	21.681	7
Agotamiento capa de Ozono	kg CFC-11-Eq/m <sup>3</sup>	1.18E-07	1.13E-07	5

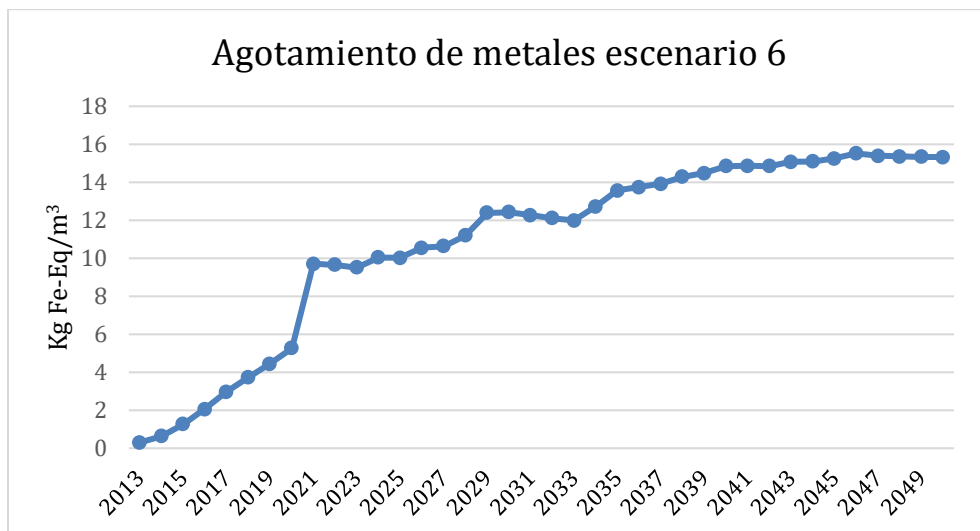
Obteniéndose disminuciones a favor del sistema swap en rangos porcentuales similares a los presentados por los escenarios anteriores.

- Escenario 6:

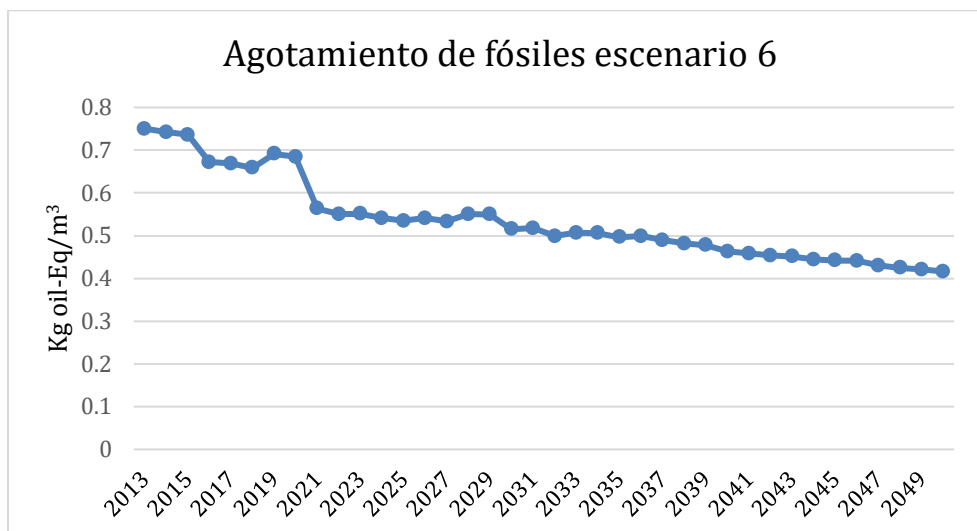
Finalmente, en el escenario que modela las matrices energéticas de acuerdo a proyecciones del gobierno hasta 2050 (podría acercarse a lo que será en la realidad), se grafica el comportamiento de las categorías del calentamiento global, agotamiento de metales y agotamiento de fósiles en función del tiempo, lo cual queda representado por los gráficos 6.24 a 6.26, respectivamente:



**Gráfico 6.24.** Variación del cambio climático escenario 6 (Fuente: Elaboración propia).



**Gráfico 6.25.** Variación del agotamiento de metales escenario 6 (Fuente: elaboración propia).

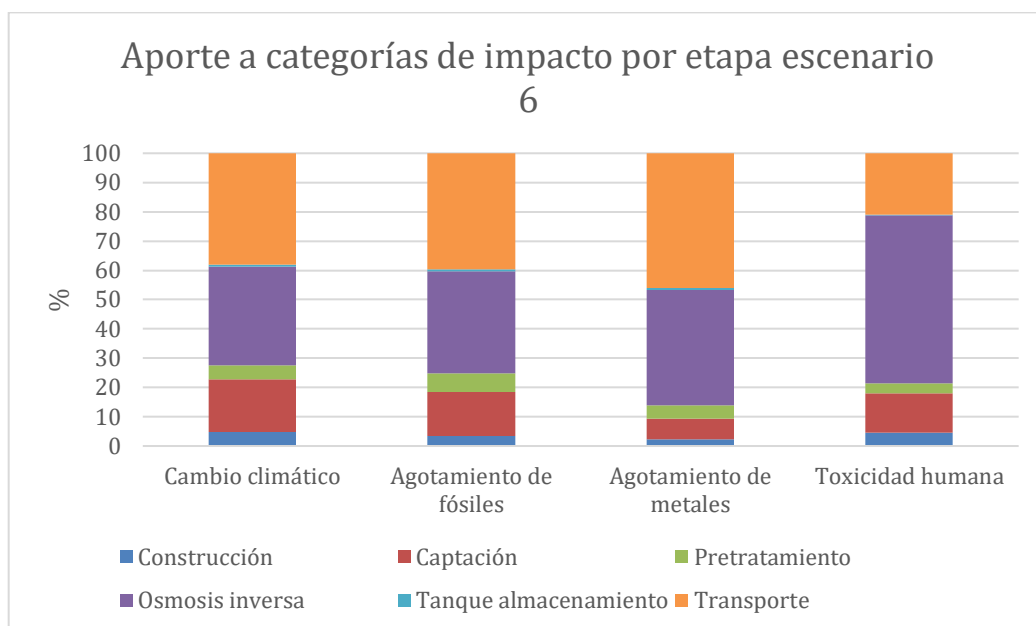


**Gráfico 6.26.** Variación del agotamiento de fósiles escenario 6 (Fuente: Elaboración propia).

A partir de los gráficos, se ratifica el comportamiento mencionado en los escenarios anteriores, disminuyen los impactos asociados al calentamiento global y agotamiento de fósiles y aumenta el agotamiento de metales. Esto se produce debido a que de acuerdo a los deseos y proyecciones del gobierno, la matriz eléctrica nacional irá disminuyendo el uso de carbon como fuente energética e incluso se espera ser un país carbono neutral al año 2050, en su defecto aumenta la utilización de energías renovables. En resumen, los valores promedios para estos impactos durante este período de tiempo son de 10.864 kg de Fe-Eq/m<sup>3</sup>, 2.888 kg de CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>3</sup> y 0.536 kg oil-Eq/m<sup>3</sup>.

Para observar un poco el panorama que podría enfrentarse en el futuro, se observa el aporte de cada etapa dentro del proceso de desalinización, algunas de las categorías de impacto más importantes quedan representadas en el gráfico 6.27:

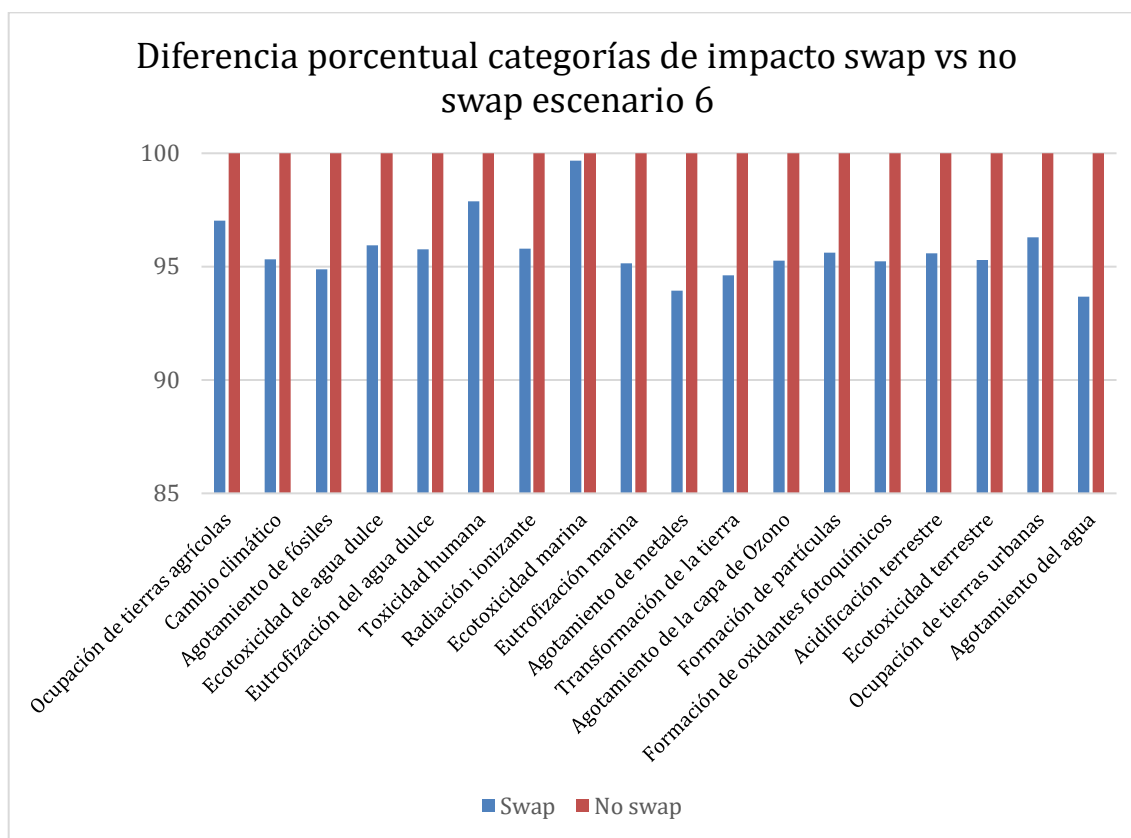
“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”



**Gráfico 6.27.** Aporte de etapas dentro de proceso de desalinización escenario 6 (Fuente: *Elaboración propia*).

Los principales aportes siguen siendo dados por el transporte del agua y la etapa de osmosis inversa, con un aporte del 38% y 34% respectivamente, en el caso del cambio climático.

Con respecto a la diferencia entre los casos swap vs no swap, que se modelan a partir del año 2021, se obtiene el gráfico 6.28, donde se comparan las 18 categorías:



**Gráfico 6.28.** Diferencia porcentual entre casos swap vs no swap del escenario 6 (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados promedio de las principales cinco categorías de impacto quedan contrastadas en la tabla a continuación:

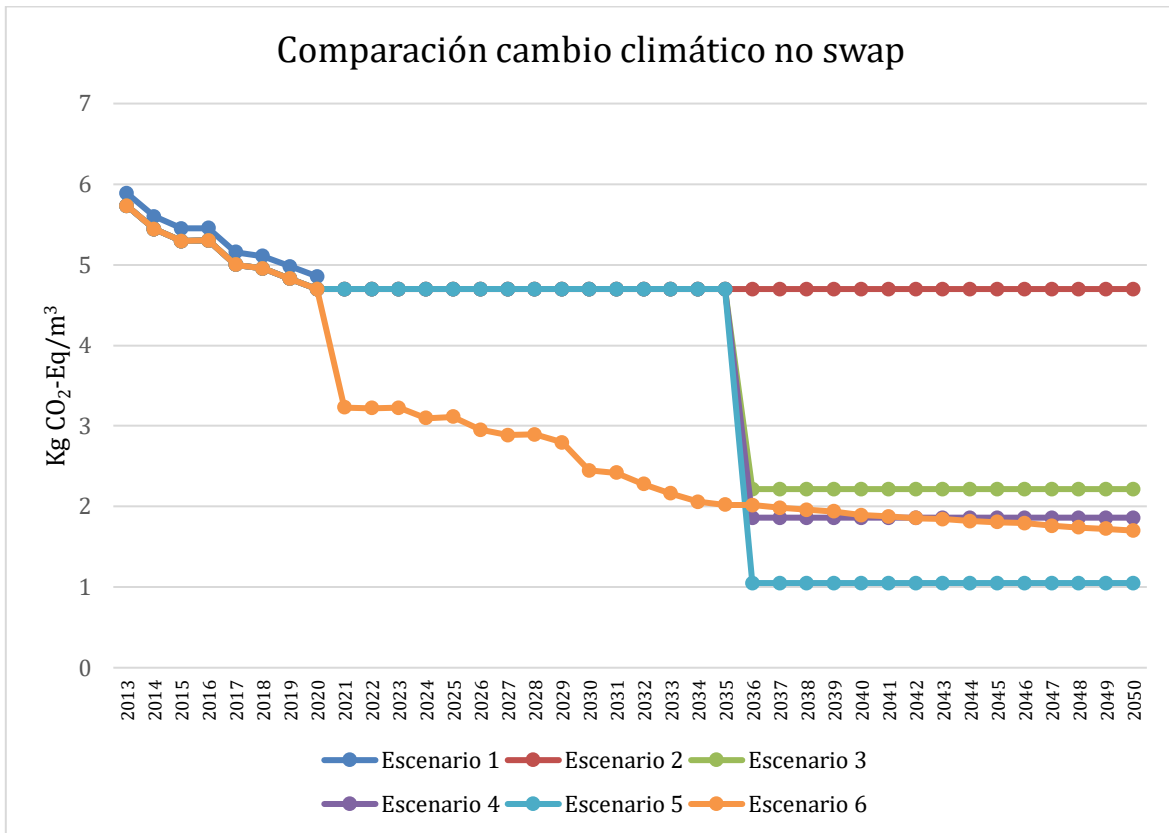
**Tabla 6.12.** Resumen principales categorías de impacto casos swap vs no swap escenario 6 (Fuente: Elaboración propia).

Categoría de impacto	Unidad	No swap	Swap	Dif [%]
Cambio climático	kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>3</sup>	2.283	2.176	5
Agotamiento de fósiles	kg oil-Eq/m <sup>3</sup>	0.491	0.467	5
Toxicidad humana	kg 1.4-DCB-Eq/m <sup>3</sup>	1.466	1.435	2
Agotamiento de metales	kg Fe-Eq/m <sup>3</sup>	13.072	12.281	6
Agotamiento capa de Ozono	kg CFC-11-Eq/m <sup>3</sup>	1.33E-07	1.27E-07	5

Donde se obtienen disminuciones a favor del sistema swap en rangos porcentuales similares a los presentados por los escenarios anteriores.

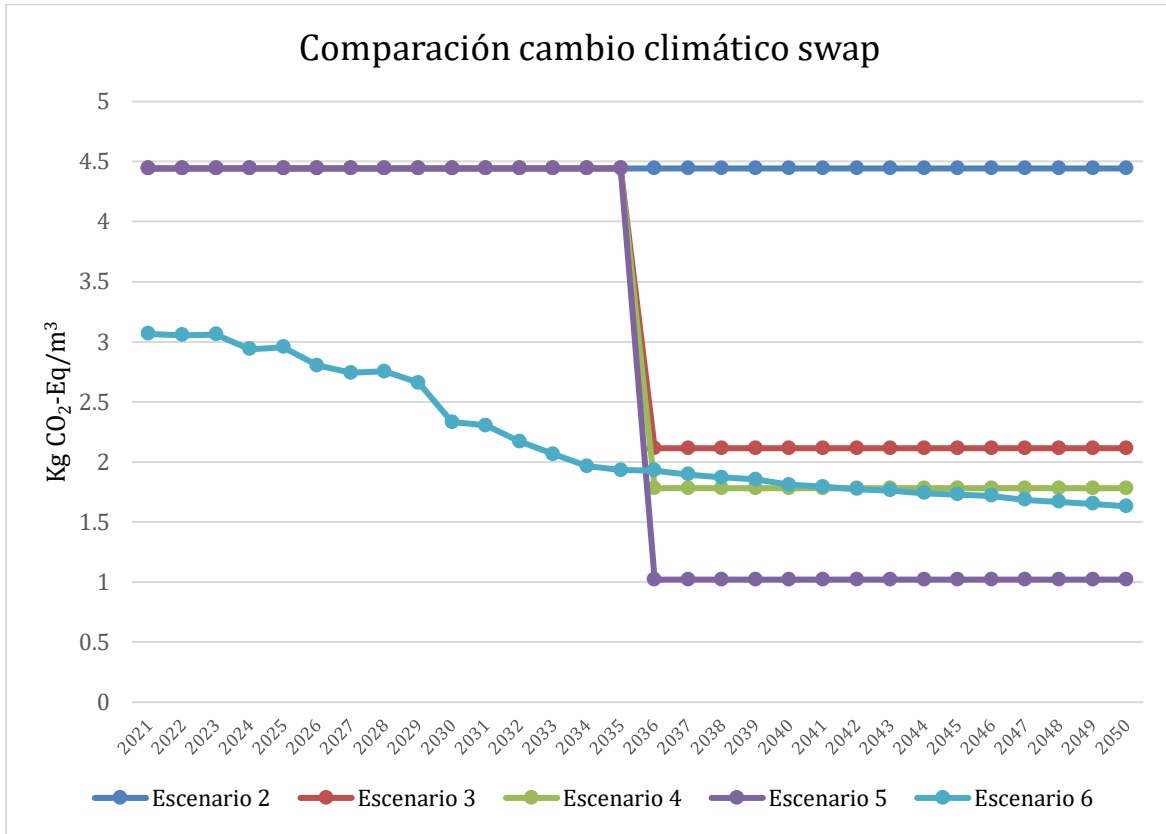
- Comparación entre escenarios:

A partir de todos los resultados expresados anteriormente, se pueden generar gráficos y tablas comparativas de todos los escenarios. En primer lugar, con respecto a la categoría más importante para este estudio, el cambio climático, se obtienen los gráficos 6.29 y 6.30:



**Gráfico 6.29.** Comparación impacto al cambio climático de los 6 escenarios no swap (Fuente: Elaboración propia).

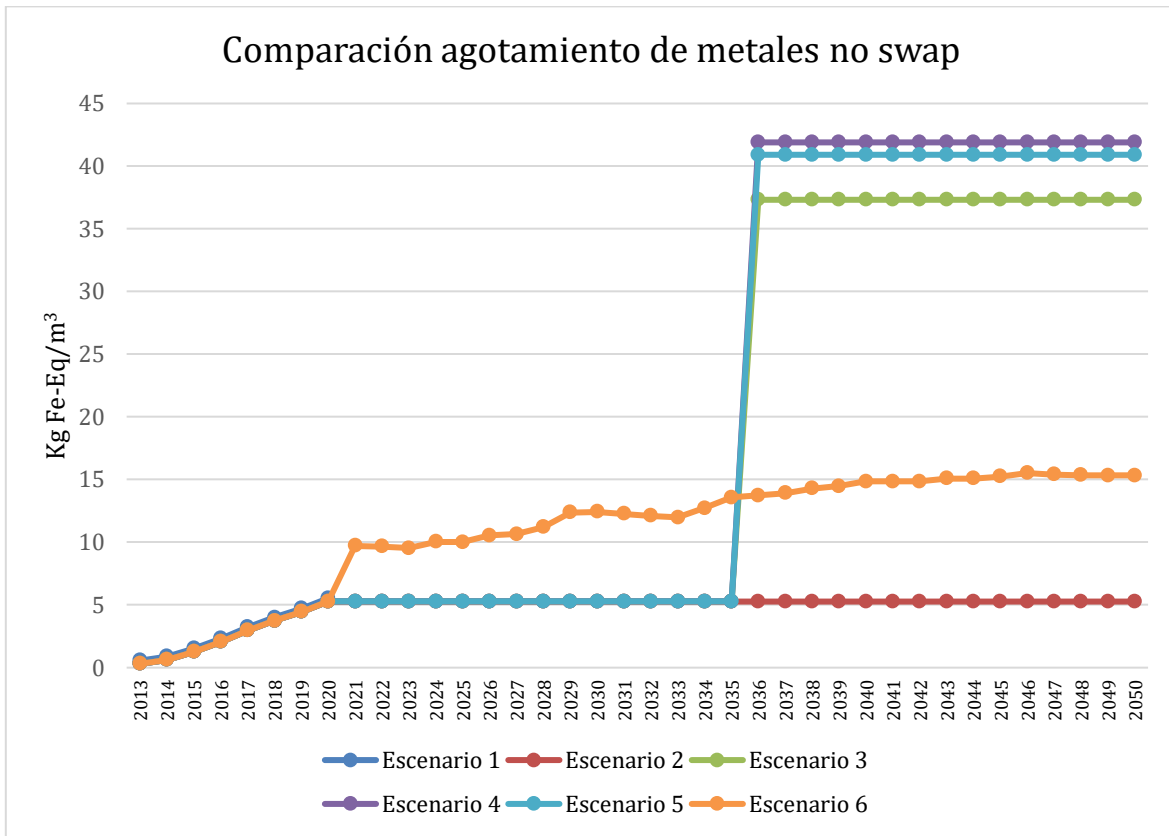
“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”



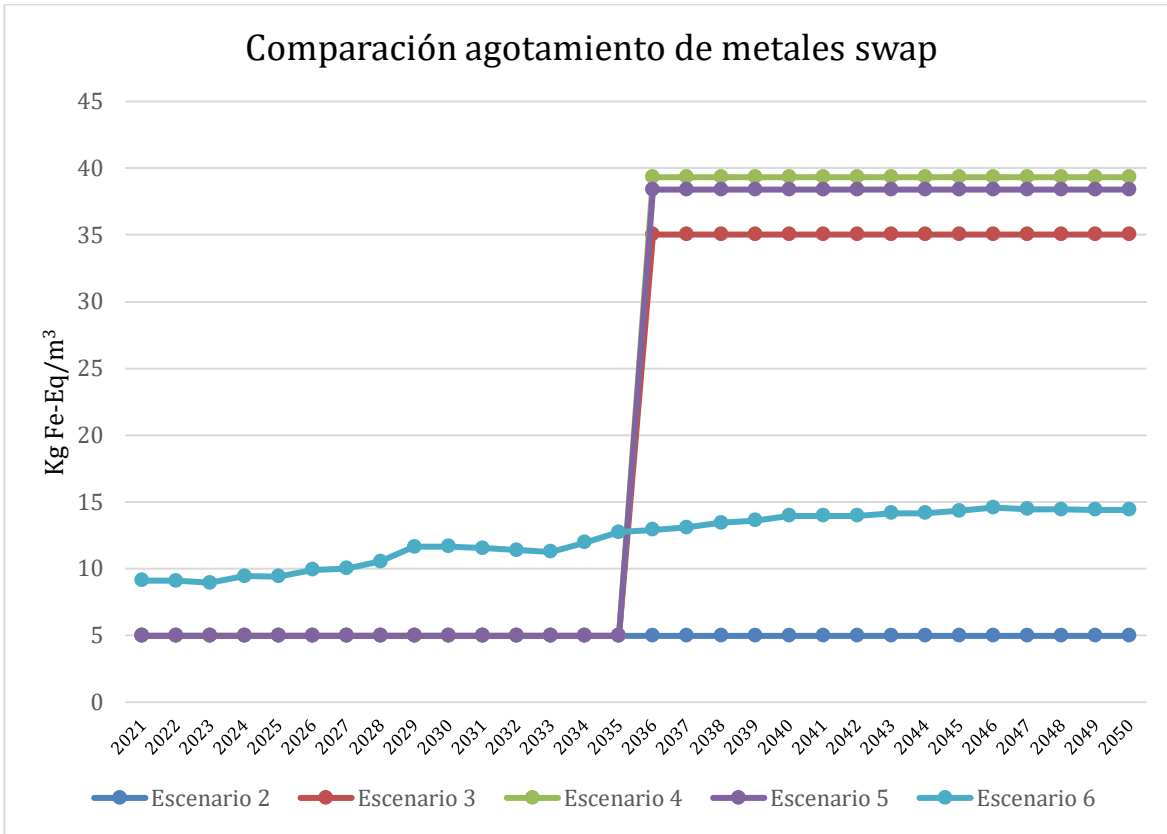
**Gráfico 6.30.** Comparación impacto al cambio climático de los 5 escenarios swap (Fuente: Elaboración propia).

A partir de estos gráficos se puede observar lo mencionado durante los resultados anteriormente, el escenario 1 es el que tiene mayor impacto al cambio climático, esto debido a los altos porcentajes de energía en base a carbón entre los años 2013 y 2020 principalmente. Por otra parte, el escenario 6 es el que cuenta con un menor aporte de CO<sub>2</sub>-Eq, lo cuál resulta positivo al tratarse de una proyección de las matrices eléctricas futuras. A pesar de esto, la combinación o mix energético que tiene menos impactos es la de 80% solar-20% eólica, siendo parte de lo esperado, producto de alimentar la planta con energías 100% renovables.

Por otra parte, con respecto a la categoría del agotamiento de metales, se realiza el mismo ejercicio, obteniéndose los gráfico 6.31 y 6.32:



**Gráfico 6.31.** Comparación impacto al agotamiento de metales de los 6 escenarios no swap  
(Fuente: Elaboración propia).



**Gráfico 6.32.** Comparación impacto al agotamiento de metales de los 5 escenarios swap (Fuente: Elaboración propia).

A partir de estos gráficos se puede observar lo mencionado durante los resultados anteriormente, el escenario 1 es el que tiene un menor impacto al agotamiento de metales, esto debido a los bajos porcentajes de energías renovables entre los primeros 8 años. Por otra parte, la combinación o mix eléctrico que más contribuye a esta categoría es la de 80% solar-20% convencional 2020.

Finalmente, con respecto al aporte de cada etapa que compone el proceso de desalinización hacia al cambio climático, se comparan solo dos escenarios, el 1 por tratarse del más “real” o actual y el 6 por tratarse de una proyección que podría representar lo que sucederá más probablemente (según el Ministerio de Energía) en el futuro, esto queda representado en el gráfico 6.14:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

**Tabla 6.13.** Comparativa del aporte de cada etapa al cambio climático según el escenario (Fuente: *Elaboración propia*).

Etapa/Escenario	1	6
Construcción [%]	5.5	4.8
Captación [%]	12.7	17.8
Pretratamiento [%]	4.6	4.9
Osmosis inversa [%]	35.5	33.6
Tanque almacenamiento [%]	0.6	0.5
Transporte agua desalinizada [%]	40.8	38.1

## 7 Conclusiones

A partir del estudio y el análisis de las etapas, se concluye con respecto a los impactos al cambio climático que la construcción aporta el 5%, la captación un 18%, el pretratamiento un 5%, la osmosis inversa un 34 %, el transporte del agua desalinizada un 38% y el impacto del tanque de almacenamiento es casi insignificante. A partir de esto, se puede notar que entre el transporte y el proceso de osmosis se tiene más del 70% del impacto, por lo que son dichas etapas las que requieren de mayor atención y pueden ser objeto de estudios para disminuir su aporte.

De acuerdo con la comparación realizada sobre el transporte de agua “Swapping” y el convencional, se concluye que caso swap genera una disminución en los impactos para el 100% de las categorías de impacto. La diferencia porcentual fluctúa entre un 1% y un 7% de disminución, por lo cual se recomienda la implementación de este método. Este nuevo sistema, proveería de 5.3 millones de m<sup>3</sup> de agua al año para el uso/consumo de las comunidades cercanas, lo cual podría satisfacer las necesidades hídricas de casi 100 mil personas (ALADYR), lo que corresponde a el 34% de la Región de Atacama (Censo, 2017).

De acuerdo a la evaluación de los escenarios propuestos, las principales conclusiones indican que el escenario 1 ha experimentado una disminución del 18% en el impacto al cambio climático y en promedio se han generado 5.31 kg de CO<sub>2</sub>-Eq por cada m<sup>3</sup> de agua desalinizada producida. Dentro de otras categorías destacadas, se producen en promedio 0.72 kg oil-Eq y 2.85 kg Fe-Eq como aporte al agotamiento de fósiles y metales, respectivamente, por cada m<sup>3</sup>. De los 5 escenarios restantes, el que genera un menor impacto es el 6, esto debido a una gran disminución en la generación de energía a partir de combustibles fósiles de acuerdo con la proyección del Ministerio de Energía, llegando prácticamente a erradicarla para el 2050. De acuerdo con este escenario, en el 2050 el obtener 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada producirá tan solo 1.70 kg de CO<sub>2</sub>-Eq lo cual equivale a un 35% de lo que se produjo en 2020, por ejemplo.

Más específicamente, al analizar los mix energéticos sugeridos, se puede concluir que el que produce un menor impacto en general es el 80% solar y 20% eólica, logrando que el desalinizar 1 m<sup>3</sup> genere tan solo 1.05 kg de CO<sub>2</sub>-Eq lo cual es un 80% menor de lo que se ha producido desde la puesta en marcha de la planta. A partir de esta información, puede justificarse la construcción de una planta fotovoltaica o parque eólico que sirvan como fuente de alimentación eléctrica para la planta, sobre todo teniendo en cuenta la ubicación geográfica en la zona norte. Los mix energéticos 70% solar-30% convencional 2020 y 80% solar-20% convencional 2020 entregan resultados de 2.21 y 1.86 kg de CO<sub>2</sub>-Eq por m<sup>3</sup> de agua desalinizada, lo cual también representa una significativa disminución.

Finalmente, la principal conclusión que se puede generar a partir de este estudio es que la clave o factor crítico para disminuir los impactos ambientales generados por una planta desalinizadora de este tipo radica en la transformación del sector eléctrico y el cambio en el

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

actual mix energético con un significativo aumento de la cuota de energías renovables. Esto puede verse claramente en los resultados obtenidos del estudio, a medida que avanzan los años, los impactos ambientales disminuyen y esto se debe principalmente a la disminución en la energía en base a carbón y el aumento de energías renovables como la solar o eólica dentro de la matriz energética nacional. Existe una categoría que tiene un comportamiento contrario al aumentar a medida que avanza el tiempo, esta es la del agotamiento de metales o recursos naturales, a partir de esto se puede concluir que es debido a que, al aumentar las energías renovables, aumenta también el uso de metales para la construcción de la infraestructura necesaria para su aplicación, por ejemplo, celdas fotovoltaicas, turbinas eólicas o baterías.

## 8 Recomendaciones

- Para la obtención de los resultados de esta memoria se utiliza una base de datos gratuita dispuesta por OpenLCA Nexus, dentro de esta, la mayoría de los datos tratan de promedios a nivel mundial o son provenientes de Europa. Esto genera que aumente la incertidumbre en los resultados, ya que la producción de algún insumo (químicos, electricidad, acero, hormigón, etc.) en Europa tiene distintos impactos a la producción del mismo insumo en Chile, esto debido a muchos factores como, por ejemplo, la diferencia en la composición de la matriz energética, el proceso utilizado para producir el insumo, entre otros. Por todo lo mencionado anteriormente, es que, para una más correcta aplicación de estudios de este tipo, se recomienda la utilización de datos locales, para lo cual debe adquirirse alguna base de datos pagada como Ecoinvent, que tiene una mayor cantidad y más específica información o la generación de una nueva a nivel nacional.
- Para un futuro estudio se recomienda realizar con mayor precisión algunas estimaciones consideradas en este caso. Como, por ejemplo, el calcular de una forma más detallada la distancia y recorrido de un hipotético nuevo acueducto para transportar el agua desalinizada hasta la comunidad. Por otra parte, realizar una investigación de las bombas existentes en el mercado para el transporte del agua desalinizada y así complementar esto con el cálculo de la energía necesaria de forma teórica.
- Al considerar el caso swap en una planta desalinizadora, será necesario evaluar si a pesar de la disminución en el caudal destinado a la faena minera se logra cubrir el 100% de sus necesidades hídricas de sus operaciones o deberá complementarse con la extracción de agua del acuífero.
- Se recomienda estudiar un aumento en el caudal de la planta desalinizadora debido a todos los efectos positivos que esta trae consigo para la III Región de Atacama.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

- Se recomienda realizar un estudio que permita obtener una localización óptima como destino de los 170 [l/s] para la comunidad, a modo de disminuir el uso de energía para el transporte del agua desalinizada.
- Finalmente, a partir de lo desarrollado en este estudio, se recomienda la aplicación de esta metodología en la industria minera de una forma más masiva o que quizás sea considerado de carácter obligatorio antes de aprobar algún proyecto, de esta manera se podrá estimar más precisamente cuales serán los impactos que este generará.

## 9 Referencias

- ALADYR. (2019). Desalación de agua de mar: Situación en Chile y en el mundo. Valparaíso, Chile.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2016). Funcionamiento e impacto ambiental del proceso de desalinización de agua de mar. Departamento de Estudios Extensión y Publicaciones, Asesoría Técnica Parlamentaria.
- CCMC. Informe consolidado de la evaluación del estudio de impacto ambiental del proyecto “Planta Desalinizadora Minera Candelaria”. Recuperado de: <https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=b4/20/1ac38ba2b062197762ec99b42f3ce979b04c>
- Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos. (2001). CIRCE – Universidad de Zaragoza. Informe “Desalación como alternativa al Plan Hidrológico Nacional (PHN) de España”.
- Cherif, H., Belhadj, J. (2018). Environmental life cycle analysis of water desalination processes. *Sustainable Desalination Handbook*, 527-559.
- COCHILCO, 2020. Consumo de agua en la minería del cobre al 2019. *Dirección de Estudios y Políticas Públicas, Ministerio de Minería*. Registro de propiedad intelectual N° 2020-A-8656.
- Comisión Nacional de Energía. (2020). Generación Bruta SEN. Recuperado de: <https://www.cne.cl/normativas/electrica/consulta-publica/electricidad/>
- CORFO. (2019). “Análisis comparativo de tecnologías emergentes para desalación de agua de mar en modelos operacionales integrados de menor costo”.
- Generadoras de Chile. (2017). Generación Eléctrica en Chile. Recuperado de: <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- Grupo Vemacero, C.A. Medidas y pesos tubería Acero. [https://ingemecanica.com/tutoriales/objetos/tuberias/Catalogo\\_Gasoductos\\_Acero.pdf](https://ingemecanica.com/tutoriales/objetos/tuberias/Catalogo_Gasoductos_Acero.pdf)

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

- ILCD handbook. (2010). Framework and requirements for Life Cycle Impact Assessment models and indicators. Recuperado de: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-Requirements-ONLINE-March-2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>
- ISO (International Organization for Standardization), “ISO 14040: Environmental Management-Life cycle assessment – Principles and framework”, vol. 2006. Switzerland: ISO 14040, 2006, P. 22.
- ISO (International Organization for Standardization), “ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment”, vol. 2006, 2006.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356.
- Lorca, J. (2014). Evaluación técnico-económico del uso de agua de mar en una planta concentradora [Título profesional, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. Sexta edición.
- OpenLCA Nexus. OpenLCA Nexus: la fuente de los conjuntos de datos LCA. Recuperado de <https://nexus.openlca.org/database/ELCD>.
- Qu, Y. (2016): Energy consumption and charging dynamics of flow-through capacitive deionization systems. Stanford University, Stanford University. Recuperado de <https://purl.stanford.edu/gc752yf8907>.
- Shahabi, M. P., McHugh, A., Anda, M., & Ho, G. (2014). Environmental life cycle assessment of seawater reverse osmosis desalination plant powered by renewable energy. *Renewable energy*, 67, 53-58.

## 10 Anexos

1. Para calcular las necesidades anuales de reactivo, se van a tener en cuenta los siguientes datos:

- Coagulante Cloruro férrico:

$$\begin{aligned} \text{Densidad de la disolución de FeCl}_3 &= 1.40 \text{ Kg/l} \\ \text{Densidad del FeCl}_3 \text{ puro} &= 2.80 \text{ Kg/l} \\ \text{Riqueza} &= 45\% \text{ (Dato EIA)} \\ \text{Dosis máxima} &= 2 \text{ mg/l} \approx 2 \text{ g/m}^3 \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}^3 \\ \text{Caudal a tratar (Q)} &= 4158 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Dato EIA)} \end{aligned}$$

Cálculo de la carga dosificadora:  $CD = Q \cdot DM$

Donde:

$CD$ : Carga dosificadora,  $\text{Kg/h}$

$Q$ : Caudal de agua a tratar,  $\text{m}^3$

$DM$ : Dosis máxima,  $\text{Kg/m}^3$

Sustituyendo:  $CD = 4158 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 8316 \text{ Kg/h}$

$$\begin{aligned} \text{Dosificación comercial} &= CD \left( \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right) \cdot \frac{1 \text{ l reactivo puro}}{2,80 \text{ kg de reactivo puro}} \cdot \frac{100 \text{ l disolución}}{45 \text{ l puro}} = \\ &= 6.66 \text{ l/h disolución} \end{aligned}$$

Cálculo de la cantidad de producto comercial:  $\dot{m} = DC \cdot \rho$

Donde:

$\dot{m}$ : Cantidad de producto,  $\text{Kg/h}$

$DC$ : Dosificación comercial,  $\text{l/h}$

$\rho$ : Densidad disolución,  $\text{Kg/l}$

Sustituyendo:  $\dot{m} = 6,66 \cdot 1.40 = 9.24 \text{ Kg/h}$

Por último, la cantidad anual que se va a utilizar de este reactivo:

$$m \text{ anual} = \dot{m} \cdot 24 \text{ h}/(1 \text{ día}) \cdot 365 \text{ días} = 80642 \text{ kg} = 80 \text{ t}$$

- Hipoclorito de sodio:

$$\text{Densidad de la disolución de NaClO} = 1.25 \text{ Kg/l}$$

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

$$\begin{aligned} \text{Riqueza} &= 120 \text{ g / l} \\ \text{Dosis máxima} &= 5 \text{ mg / l} \approx 5 \text{ g / m}^3 \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ Kg / m}^3 \\ \text{Caudal a tratar (Q)} &= 4158 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Dato EIA)} \end{aligned}$$

Cálculo de la carga dosificadora:  $C_D = Q \cdot D_M$

Donde:

$C_D$ : Carga dosificadora,  $\text{Kg / h}$

$Q$ : Caudal de agua a tratar,  $\text{m}^3$

$D_M$ : Dosis máxima,  $\text{Kg / m}^3$

Sustituyendo:

$$C_D = 4158 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 20.79 \text{ Kg / h}$$

$$\text{Dosificación comercial} = 20.79 \left( \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \right) \cdot \frac{1 \text{ l reactivo puro}}{120 \cdot 10^{-3} \text{ kg de reactivo puro}} = 173.25 \text{ l / h disolución}$$

Cálculo de la cantidad de producto comercial:  $\dot{m} = DC \cdot \rho$

Donde:

$\dot{m}$ : Cantidad de producto,  $\text{Kg / h}$

$DC$ : Dosificación comercial,  $\text{l / h}$

$\rho$ : Densidad disolución,  $\text{Kg / l}$

$$\text{Sustituyendo: } \dot{m} = 173.25 \cdot 1.25 = 216.56 \text{ Kg / h}$$

Por último, la cantidad anual que se va a utilizar de este reactivo:

$$m \text{ anual} = 216.56 \cdot \left( \frac{24 \text{ h}}{1} \text{ día} \right) \cdot 365 \text{ días} = 1897065.6 \text{ kg} = 1897 \text{ t}$$

- Ácido sulfúrico:

$$\text{Densidad de la disolución de } \text{H}_2\text{SO}_4 = 1.85 \text{ Kg / l}$$

$$\text{Densidad del } \text{H}_2\text{SO}_4 = 1.85 \text{ Kg / l}$$

$$\text{Riqueza} = 98 \%$$

$$\text{Dosis máxima} = 20 \text{ mg / l} \approx 20 \text{ g / m}^3 \approx 20 \cdot 10^{-3} \text{ Kg / m}^3$$

$$\text{Caudal a tratar (Q)} = 4158 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Dato EIA)}$$

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Cálculo de la carga dosificadora:  $C_D = Q \cdot D_M$

Donde:

$C_D$ : Carga dosificadora,  $Kg / h$

$Q$ : Caudal de agua a tratar,  $m^3$

$D_M$ : Dosis máxima,  $Kg / m^3$

Sustituyendo:

$$C_D = 4158 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 83.16 \text{ Kg / h}$$

$$\text{Dosificación comercial} = 83.16 \left( \frac{Kg}{h} \right) \cdot \frac{1 \text{ l reactivo puro}}{1.85 \text{ kg de reactivo puro}} \cdot \frac{100 \text{ l de disolución}}{98 \text{ l puro}} = 45.86 \text{ l / h disolución}$$

Cálculo de la cantidad de producto comercial:  $\dot{m} = DC \cdot \rho$

Donde:

$\dot{m}$ : Cantidad de producto,  $Kg / h$

$DC$ : Dosificación comercial,  $l / h$

$\rho$ : Densidad disolución,  $Kg / l$

$$\text{Sustituyendo: } \dot{m} = 45.86 \cdot 1.85 = 84.841 \text{ Kg / h}$$

Por último, la cantidad anual que se va a utilizar de este reactivo:

$$m \text{ anual} = 84.841 \cdot \left( \frac{6h}{1 \text{ día}} \right) \cdot 365 \text{ días} = 185801 \text{ kg} = 185.8 \text{ t}$$

- Bisulfito sódico:

$$\text{Densidad de la disolución de NaHSO}_3 = 1.36 \text{ Kg / l}$$

$$\text{Riqueza} = 40 \%$$

$$\text{Dosis máxima} = 15 \text{ mg / l} \approx 15 \text{ g / m}^3 \approx 15 \cdot 10^{-3} \text{ Kg / m}^3$$

$$\text{Caudal a tratar (Q)} = 4158 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (Dato EIA)}$$

Cálculo de la carga dosificadora:  $C_D = Q \cdot D_M$

Donde:

$C_D$ : Carga dosificadora,  $Kg / h$

$Q$ : Caudal de agua a tratar,  $m^3$

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

$D_M$ : Dosis máxima,  $Kg / m^3$

Sustituyendo:

$$C_D = 4158 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 62.37 \text{ Kg / h}$$

$$\text{Dosificación comercial} = 62.37 \left( \frac{Kg}{h} \right) \cdot \frac{1 \text{ l reactivo puro}}{1.36 \text{ kg de reactivo puro}} \cdot \frac{100 \text{ l de disolución}}{40 \text{ l puro}} = 114.65 \text{ l / h disolución}$$

Cálculo de la cantidad de producto comercial:  $\dot{m} = DC \cdot \rho$

Donde:

$\dot{m}$ : Cantidad de producto,  $Kg / h$

$DC$ : Dosificación comercial,  $l / h$

$\rho$ : Densidad disolución,  $Kg / l$

Sustituyendo:  $\dot{m} = 114.65 \cdot 1.36 = 155.92 \text{ Kg / h}$

Por último, la cantidad anual que se va a utilizar de este reactivo:

$$m \text{ anual} = 155.92 \cdot \left( \frac{6h}{1 \text{ día}} \right) \cdot 365 \text{ días} = 341464.8kg = 341.5 t$$

- $CO_2$ :

$$Q_P = \text{Caudal permeado} = 1800 \text{ m}^3/h$$
$$\text{Dosis media} = \frac{100 + 60}{2} = 80 \text{ mg/l} = 80 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$$

El cálculo del flujo másico de  $CaCO_3$  se calcula:

$$\text{Flujo másico de } CaCO_3 = \text{Dosis} \cdot Q_P$$

Donde

Flujo másico,  $Kg/h$

Dosis,  $Kg/m^3$

$Q_P$ : Caudal permeado,  $m^3/h$

Sustituyendo:

$$\text{Flujo másico de } CaCO_3 = 80 \cdot 10^{-3} \cdot 1800 = 144 \text{ Kg/h}$$

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Como por cada mol de CaCO<sub>3</sub> hay un mol de CO<sub>2</sub>, y teniendo en cuenta que los pesos moleculares son 100 g/mol y 44 g/mol respectivamente, se puede calcular la cantidad necesaria de CO<sub>2</sub> del dosificador:

$$\text{Flujo másico de CO}_2 = \text{Flujo masico de CaCO}_3 \cdot \text{factor estequiometrico}$$

Sustituyendo:

$$\text{Flujo másico de CO}_2 = 144 \cdot 0.44 = 63.36 \text{ Kg/h}$$

2. Representación de las matrices eléctricas en el software, utilizadas para simular los diversos escenarios:

- Matriz SIC/SING 2011:

**Tabla 10.1.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2011 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SIC/SING para 2011. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.00523146	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.1486768	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.18431208	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía petróleo	0.07143203	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía gas natural	0.22852114	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.34748841	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	98.566 %		

- Matriz SIC/SING 2012:

**Tabla 10.2.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2012 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SIC/SING para 2012. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.005843046	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.144397998	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.162613657	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía petróleo	0.059086471	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.190043937	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.40974553	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.0003814	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	97.211 %		

- Matriz SIC/SING 2013:

**Tabla 10.3.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2013 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SIC/SING para 2013. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0.00010287	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.00792065	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.14649522	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.14026451	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía petróleo	0.04124908	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.16542248	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.46360029	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.0017781	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	96.683 %		

- Matriz SIC/SING 2014:

**Tabla 10.4.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2014 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SIC/SING para 2014. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0.00656671	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.02018656	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.16765859	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.16870297	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía petróleo	0.0394718	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.14346619	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.41335947	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.0017454	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	96.116 %		

- Matriz SIC/SING 2015:

**Tabla 10.5.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2015 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SIC/SING para 2015. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0.018967657	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.029009358	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.170848384	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.162006109	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía geotérmica	0	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía petróleo	0.03013905	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.154711929	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.399199453	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.001868872	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	96.675 %		

- Matriz SIC/SING 2016:

**Tabla 10.6.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2016 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SIC/SING para 2016. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0.03476246	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.03070002	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.15679913	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.10829528	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

			storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía petróleo	0.02576511	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.16341081	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.44245109	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.00178584	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	96.340 %		

- Matriz SIC/SING 2017:

**Tabla 10.7.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2017 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SIC/SING para 2017. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0.052551358	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.047304315	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.166219297	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.127399274	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

			storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.000863267	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía petróleo	0.011384329	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.162644833	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.396657539	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.00184793	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	96.687 %		

- Matriz SEN 2018:

**Tabla 10.8.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2018 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SEN para 2018. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0.06767494	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.04717019	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.16179056	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.14418107	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía geotérmica	0.00282915	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía petróleo	0.00404543	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.15149192	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.38740894	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.00185085	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	96.844 %		

- Matriz SEN 2019:

**Tabla 10.9.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2019 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SEN para 2019. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0.081718422	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.062248683	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.149985732	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.119723973	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía geotérmica	0.002620178	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía petróleo	0.00716009	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.183243832	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.368018263	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.001686253	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	97.640 %		

- Matriz SEN 2020:

**Tabla 10.10.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2020 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de información SEN para 2020. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía fotovoltaica	0.09801272	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.0709836	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.14446418	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.12107756	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía geotérmica	0.00317914	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía petróleo	0.00866219	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.17652586	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.35055474	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía cogeneración	0.00235539	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   heat and power co-generation, biogas, gas engine   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	97.582 %		

- Matriz proyectada 2021:

**Tabla 10.11.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2021 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2021. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.008194692	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.185282569	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.147905342	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.226090955	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía hidroeléctrica embalse	0.183030503	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.007251418	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.024678403	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.01991487	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.057280306	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.140323779	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2022:

**Tabla 10.12.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2022 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2022. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.008006126	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.184388618	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.151665972	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.227572151	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

			river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.187046066	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.007127817	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.023928294	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.015190244	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.052113009	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.142916662	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2023:

**Tabla 10.13.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2023 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2023. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.007974977	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.181627605	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.150969975	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía hidroeléctrica pasada	0.229898954	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.186241778	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.007065452	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.023780738	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.015273356	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.053539936	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.143582861	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2024:

**Tabla 10.14.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2024 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2024. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.007737498	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.191916409	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.15382411	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

			turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.237029771	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.179329196	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.006866754	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.023245561	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.013127294	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.055198563	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.131680757	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2025:

**Tabla 10.15.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2025 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2025. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.007652584	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.1915238	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía eólica	0.153756373	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.236261135	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.1761856	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.006859798	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.023199991	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.013180061	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.053997512	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.137339103	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2026:

**Tabla 10.16.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2026 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2026. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.007774571	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía fotovoltaica	0.201903931	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.15611786	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.245609325	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.185873772	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.006879656	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.024845068	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.014531177	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.049265051	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.107154843	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2027:

**Tabla 10.17.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2027 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2027. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía termosolar de concentración (CSP)	0.007407979	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.203697375	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.169281139	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.241784529	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.183479766	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.006779624	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.024483812	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.014275793	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.04755658	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.101209308	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2028:

**Tabla 10.18.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2028 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2028. Generación 1[kWh].

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.006980251	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.214732336	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.161800525	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.234281256	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.174495724	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.006168348	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.023640064	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.01365472	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.062632461	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.101572138	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2029:

**Tabla 10.19. Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2029 (Fuente: Elaboración propia).**

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2029. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.006915372	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.238078994	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.158040541	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.231546087	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.175179086	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.006181454	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.022596417	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.012538634	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.061607798	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.087274268	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2030:

**Tabla 10.20. Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2030 (Fuente: Elaboración propia).**

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2030. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00673935	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.238711074	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.21927619	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.225757919	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.170225263	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.005997403	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.021124874	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.011273469	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.050452381	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.050400857	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2031:

**Tabla 10.21.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2031 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2031. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.006630826	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.235863589	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.227070093	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.22399951	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.169157477	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00593714	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.021126832	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.011333612	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.052801779	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.046038336	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2032:

**Tabla 10.22.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2032 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2032. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00614387	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.23261084	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.25956328	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.21912455	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.16519952	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00554962	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01939851	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00969925	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.04864734	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.03389199	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Porcentaje de matriz representada en software	99.983 %
---	----------

- Matriz proyectada 2033:

**Tabla 10.23.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2033 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2033. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00602141	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.23006339	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.27919688	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 133MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.21508427	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.16196296	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00532701	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01890742	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00941403	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05647425	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía carbón	0.01696311	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.941 %		

- Matriz proyectada 2034:

**Tabla 10.24.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2034 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2034. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00806187	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.24482359	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.27754471	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.20894152	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.15724505	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00507492	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01767037	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00865152	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05971967	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas,

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

			conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00420493	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.194 %		

- Matriz proyectada 2035:

**Tabla 10.25.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2035 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2035. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00543136	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.26127853	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.27047802	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.20160874	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.15156128	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00475479	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.0171398	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00860749	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía gas natural	0.05810992	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00400304	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	99.995 %		

- Matriz proyectada 2036:

**Tabla 10.26.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2036 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2036. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00532439	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.26465359	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.26925947	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.19867903	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.14891716	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00465193	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01686672	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía petróleo	0.00860377	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.06089888	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00393342	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	98.179 %		

- Matriz proyectada 2037:

**Tabla 10.27.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2037 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2037. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00515789	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.26827314	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.27372808	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.19392936	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.14520398	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00454578	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía por biocombustible	0.01596875	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00843445	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05860908	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00381666	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	97.767 %		

- Matriz proyectada 2038:

**Tabla 10.28.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2038 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2038. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00489283	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.27557976	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.27144238	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.18877372	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.1416286	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía geotérmica	0.00443605	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01545151	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00828356	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05706254	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00371574	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	97.127 %		

- Matriz proyectada 2039:

**Tabla 10.29.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2039 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2039. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00475391	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.27926624	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.27386643	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.18368858	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.13825087	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

			storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00419412	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01528657	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00815571	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05739138	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00367739	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	96.853 %		

- Matriz proyectada 2040:

**Tabla 10.30.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2040 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2040. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00453772	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.28658537	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.26693304	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.17957359	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía hidroeléctrica embalse	0.13388776	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00402055	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01510627	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00764906	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05280938	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00363685	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	95.474 %		

- Matriz proyectada 2041:

**Tabla 10.31.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2041 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2041. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.0044189	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.28672854	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.27393914	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.17602643	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

			river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.13136191	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00378763	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01470781	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00763265	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05249393	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00356628	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	95.466 %		

- Matriz proyectada 2042:

**Tabla 10.32.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2042 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2042. Generación 1[kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00433967	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.28659533	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.28110432	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía hidroeléctrica pasada	0.17312786	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.12828193	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00365531	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01432333	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00748774	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05238199	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00347818	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	95.478 %		

- Matriz proyectada 2043:

**Tabla 10.33.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2043 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2043. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00424192	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.29105576	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.28054933	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

			turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.16815016	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.12584897	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00359658	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01415811	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00741353	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05270531	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00342344	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	95.114 %		

- Matriz proyectada 2044:

**Tabla 10.34.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2044 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2044. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00416528	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.29118336	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía eólica	0.28670896	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.16540575	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.12273286	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00365525	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01387139	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00703229	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05211626	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00329977	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	95.017 %		

- Matriz proyectada 2045:

**Tabla 10.35.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2045 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2045. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00408216	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía fotovoltaica	0.29449855	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.2871749	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.16216544	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.12066223	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00352929	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01354156	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00673291	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05253791	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00316576	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	94.809 %		

- Matriz proyectada 2046:

**Tabla 10.36.** Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2046 (Fuente: Elaboración propia).

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2046. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00405113	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.29973931	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.2844161	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.15867549	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.11817899	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00371045	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01330875	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00652477	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05356825	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00310315	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	94.528 %		

- Matriz proyectada 2047:

**Tabla 10.37. Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2047 (Fuente: Elaboración propia).**

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2047. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.0039198	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.29730123	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.2965449	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.1557448	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.11466325	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00358527	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01262481	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00633422	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05089195	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00303257	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	94.464 %		

- Matriz proyectada 2048:

**Tabla 10.38.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2048 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2048. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00391106	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.29649287	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.30420813	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.15074339	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.11233089	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00356911	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01224612	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00612662	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05038078	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0,00297782	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	94.299 %		

- Matriz proyectada 2049:

**Tabla 10.39. Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2049 (Fuente: Elaboración propia).**

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2049. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00383621	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.29613584	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.3090979	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.14857103	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.10997834	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.0035008	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01196283	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00589756	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05043673	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía carbón	0.00290685	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

Porcentaje de matriz representada en software	94.232 %
---	----------

- Matriz proyectada 2050:

**Tabla 10.40.** *Inventario de generación eléctrica de 1 [kWh] año 2050 (Fuente: Elaboración propia).*

Electricidad – Chile. Adaptado de proyección del ministerio de Energía (escenario A) para 2050. Generación 1 [kWh].			
Componente	Cantidad	Unidad	Flujo base de datos
Energía termosolar de concentración (CSP)	0.00356598	kWh	Electricity, at solar tower, DNI2000, with storage, 15MW – MA.
Energía fotovoltaica	0.29590084	kWh	Electricity, photovoltaic, ground mounted power plant, mc-Si, Central Europe – RER.
Energía eólica	0.31865191	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica pasada	0.14230372	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, run-of-river   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía hidroeléctrica embalse	0.10649336	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hydro, pumped storage   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía geotérmica	0.00317584	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, deep geothermal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía por biocombustible	0.01125234	kWh	6142-Q BioFuel Power Used in Place/MJ S.
Energía petróleo	0.00588626	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, oil   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Energía gas natural	0.05054653	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, natural gas, conventional power plant   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.

Energía carbón	0.00279939	kWh	Electricity, high voltage {RoW}   electricity production, hard coal   Cut-off, S – Copied from Ecoinvent.
Porcentaje de matriz representada en software	94.058 %		

### 3. Cálculo del diámetro de tubería necesario para caso swap:

Este cálculo viene dado por la ecuación de continuidad.

$$Q = v * A$$

Donde:

- $Q$ : Caudal [ $m^3/s$ ]
- $v$ : Velocidad [ $m/s$ ]
- $A$ : Área [ $m^2$ ]

Y como el área viene dada por:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

Donde  $d$  es el diámetro de la tubería, se obtiene lo siguiente:

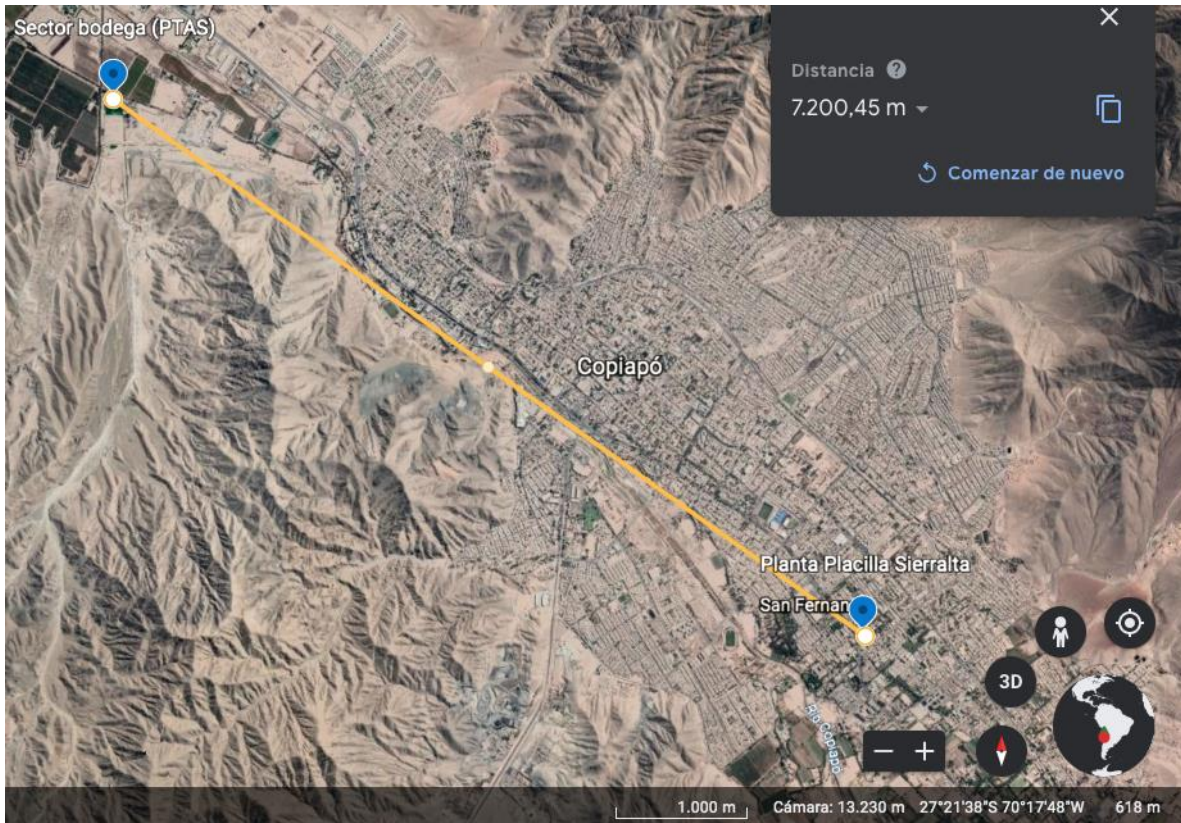
$$d = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v}} = \sqrt{\frac{4 * 0.17}{\pi * 1.52}} = 0.37736 \text{ m} \approx 0,4 \text{ m}$$

### 4. Cálculo de la potencia necesaria para transportar el agua desalinizada:

- Cálculo de la distancia entre sector bodega y destino de agua deslizada hasta comunidad (Copiapó).

La potencia dependerá del largo de la tubería, esta se determina como una línea recta de acuerdo a la herramienta Google Earth.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”



*Figura 10.1. Determinación de distancia del acueducto para transporte de agua hacia comunidad (Fuente: Google Earth, 2021).*

- Cálculo del factor de fricción de Darcy:

El factor de fricción de Darcy se calcula con la ecuación de Colebrook-White mediante métodos numéricos o iterativos. En este caso se utiliza el software matlab con el siguiente código.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

```

>> % Código que calcula coeficiente de Fricción de Darcy
% para la fórmula de Colebrook-White.
clear;
% re=input('Número de Reynolds (Adim.): ');
% e=input('Rugosidad Absoluta (mm): ');
% d=input(' Diámetro (mm): ');
re=797940; % Número de Reynolds
e=0.05;    % Rugosidad Absoluta
d=600;     % Diámetro interno
% proponemos valores de a y b
a=0.0;
b=10;
% Proponemos un valor de f inicial para que entre al ciclo
f=1;
while abs(f)>0.00001
    % Calculamos el valor de C
    c=(a+b)./2;
    % Evaluamos en C
    fa=1/sqrt(c);
    fb=-2*(log((e/d)/3.71+2.51/(re*sqrt(c))))*0.434294481903252000;
    f=fb-fa;
    if f>0
        b=c;
    else
        a=c;
    end
end
fprintf('Factor de Pérdida de carga =%8.9f \n', c).

```

**Figura 10.2.** Código utilizado para calcular el factor de fricción de Darcy en Matlab (Fuente: Jiménez, 2016).

- Cálculo de potencia para transporte de agua desalinizada para el caso no swap:

**Tabla 10.41.** Parámetros relevantes acueductos escenario no swap (Fuente: Elaboración propia).

Acueducto	Diámetro [mm]	Largo [km]	Rugosidad [mm]	Altura inicial [msnm]	Altura final [msnm]
Tramo 1	600	80	0.05	20	345
Tramo 2	600	29.5	0.05	345	760

**Tabla 10.42.** Potencia necesaria para el transporte de agua desalinizada escenario no swap  
(Fuente: Elaboración propia).

Flujo [m <sup>3</sup> /h]	Velocidad [m/s]	Re	f	Hg [m]	Hf [m]	H [m]	Potencia teórica [kW]	Potencia consumida [kW]
1800	1.52	797940	0.0135	325	212.0	537	2629	3094
1800	1.52	797940	0.0135	415	78.2	493.2	2415	2841

- Cálculo de potencia para transporte de agua desalinizada para el caso swap:

**Tabla 10.43.** Parámetros relevantes acueductos escenario swap (Fuente: Elaboración propia).

Acueducto	Diámetro interno [mm]	Largo [km]	Rugosidad [mm]	Altura inicial [msnm]	Altura final [msnm]
Tramo 1	600	80	0.05	20	345
Tramo 2	600	29.5	0.05	345	760
Tramo 3	400	7.2	0.05	345	410

**Tabla 10.44.** Potencia necesaria para transporte de agua desalinizada escenario swap (Fuente: Elaboración propia).

Flujo [m <sup>3</sup> /h]	Velocidad [m/s]	Re	f	Hg [m]	Hf [m]	H [m]	Potencia teórica [kW]	Potencia consumida [kW]
1800	1.52	797940	0.0135	325	212.0	537	2629	3094
1180	1.52	797940	0.0135	415	78.2	493.2	1594	1875
612	1.52	531960	0.0146	65	30.9	95.9	160	188

## 5. Inventario del ciclo de vida:

A continuación se adjunta tabla completa generada a partir de todo lo mencionado durante el informe con los insumos utilizados y el flujo utilizado en el software OpenLCA.

- Construcción:

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

**Tabla 10.45.** Inputs ingresados en OpenLCA para etapa de construcción (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Construcción	Energía eléctrica	8640	MWh	Información obtenida directamente de EIA. Fuente energética es simulada según información del SEN.
	Acero	980	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Steel, low-alloyed [GLO   market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Other/ Ecoinvent cut-off S copy.
	Concreto	20900	ton	EIA informa que se utilizan 5500 m <sup>3</sup> de concreto. Software mide concreto en masa por lo que se utiliza una densidad del concreto de 2200 kg/m <sup>3</sup> para calcularlo. Flow Openlca: Concrete bloack [GLO]  market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
	Revestimiento piscinas	15.65	ton	EIA informa que se utilizan 17000 m <sup>2</sup> de revestimiento para piscinas. Software y flujo utilizado miden esta variable en masa. Para esto se utiliza catálogo de gemembrana de HDPE donde se indica que un rollo de 2173.1 m <sup>2</sup> tiene un peso aproximado de 2 toneladas, lo que permite estimar el valor utilizado. Flow Openlca: Add 0.5 mm High Density Polyethylene HDPE Damp Proof Membrane - AU. Categoría: Building products/Membranes & flashing.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

	Tubería acero	4494.915	ton	Programa de cumplimiento de CCMC informa que se construye el acueducto Chamonate-Candelaria con una extensión de 29.5 km de tuberías de acero. Software y flujo utilizado miden esta variable en masa. Para esto se utiliza catálogo técnico de centralpiping. Se considera un espesor de paredes de 10.31 mm (promedio), entregando una masa de 152.37 kg/m, obtenido el valor utilizado. Flow Openlca: Chromium steel pipe [GLO]   production   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
	Tubería acero	10970.64	ton	EIA informa que se construyen 72 km de tuberías de acero. Software y flujo utilizado miden esta variable en masa. Para esto se utiliza catálogo técnico de centralpiping. Se considera un espesor de paredes de 10.31 mm (promedio), entregando una masa de 152.37 kg/m, obtenido el valor utilizado. Flow Openlca: Chromium steel pipe [GLO]   production   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
	Tubería HDPE	533.28	ton	EIA informa que se construyen 9 km de tuberías de HDPE, de los cuales 8.5 km son de diámetro 24" y 500 m son de diámetro 36". Software y flujo utilizado miden esta variable en masa. Para esto se utiliza catálogo técnico de empresa Tigre, una tubería de 36" y 24.5 mm de espesor entrega una masa de 60.53 kg/m y una tubería de 24"

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

				y 19.3 mm de espesor entrega una masa de 37.54 kg/m, obteniendo el resultado utilizado. Flow Openlca: HDPE granulates. Categoría: Materials production/Plastics.
	Agua potable	63072	ton	EIA informa que se consumen 1 l/s de agua potable durante los 24 meses de la construcción, alcanzando los 63072 m <sup>3</sup> de agua. Software mide agua en masa por lo que se utiliza una densidad del agua de 1000 kg/m <sup>3</sup> para calcularlo, obteniendo valor utilizado. Flow Openlca: Drinking water. Categoría: Materiales production/Water.
	Agua industrial	3650	ton	EIA informa que se utilizan 50 m <sup>3</sup> /día de agua industrial durante los 24 meses de la construcción, alcanzando los 3650 m <sup>3</sup> de agua. Software mide agua en masa por lo que se utiliza una densidad del agua de 1000 kg/m <sup>3</sup> para calcularlo, obteniendo valor utilizado. Flow Openlca: Water for industrial use. Categoría: Materiales production/Water.
	Excavación	528600	m <sup>3</sup>	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Excavation, hydraulic digger [RER]   processing   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - RER. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.

**Tabla 10.46.** Outputs ingresados en OpenLCA para la etapa de construcción (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Construcción	Monoxido de carbono	9	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Carbon monoxide.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

				Categoría: Emission to air/ high population density.
	Óxidos de nitrógeno	18	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Nitrogen oxides. Categoría: Emission to air/ high population density.
	Material particulado MP10	38	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Particulates, <10 um. Categoría: Emission to air/ high population density.
	Residuos industriales no peligrosos	432	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Waste, industrial. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Residuos peligrosos	48	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Hazardous waste, DK. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Tierra usada	221.9	ha	Información obtenida directamente de EIA y del programa de cumplimiento de Minera Candelaria 2015. 100 ha corresponden al proyecto planta desalinizadora y 121.9 corresponden al proyecto acueducto Chamonate-Candelaria. Flow Openlca: From construction site. Categoría: Land use/ Land transformation.
	Aguas servidas	89280	ton	EIA informa que se generan 89280 m3 de aguas servidas, software mide en masa, al no tener mayor información sobre aguas servidas se usa densidad igual a 1. Openlca: Water (wastewater) [Water]. Categoría: Unmapped flows/ Emission output to freshwater - Gabi.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

	Residuos envases papel y cartón (Residuos domésticos)	624	ton	EIA informa que los residuos domésticos corresponden principalmente a envases de cartón, papel y plástico. Flow Openlca: Packaging waste, paper and board. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Residuos envases plasticos (Residuos domésticos)	312	ton	EIA informa que los residuos domésticos corresponden principalmente a envases de cartón, papel y plástico. Flow Openlca: Packaging waste, plastic. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.

- Captación:

**Tabla 10.47.** Inputs ingresados en OpenLca para etapa de captación (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Captación	Energía eléctrica	7884000	kWh	Información obtenida mediante estimaciones y bibliografía. Fuente energética es simulada según información del SEN.
	Agua de mar	37407530	ton	Se sabe que ingresan a la planta 1155 l/s de agua de mar. Software mide agua de mar en masa por lo que se utiliza una densidad de agua de mar de 1027 kg/m <sup>3</sup> obteniendo valor utilizado. Flow Openlca: Sea water. Categoría: Resources from water/Renewable material resources from water.
	Hipoclorito de sodio	1897	ton	EIA informa sobre su utilización, la cantidad es calculada en base a producción (anexo 1). Flow Openlca: Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state [GLO]   market for   Cut-off - Copied from Ecoinvent - GLO.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

				Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
--	--	--	--	---

**Tabla 10.48.** Outputs ingresados en OpenLCA para etapa de captación (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Captación	Arenas	158.16	ton	Información obtenida directamente del EIA. Openlca: Sand. Categoría: Resources from fround/Non-renewable material resources from ground.
	Residuos peligrosos	7.2	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Hazardous waste, DK. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Residuos industriales no peligrosos	12	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Waste, industrial. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Aguas servidas	2.43	kg	EIA informa que se generan 0.02 L por día de aguas servidas, software mide en masa, al no tener mayor información sobre aguas servidas se usa densidad igual a 1 kg/m <sup>3</sup> , obteniendo valor utilizado. Openlca: Water (wastewater) [Water]. Categoría: Unmapped flows/ Emission output to freshwater - Gabi.
	Residuos envases papel y cartón (Residuos domésticos)	1.22	ton	EIA informa que los residuos domésticos corresponden principalmente a envases de cartón, papel y plástico. Flow Openlca: Packaging waste, paper and board. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Residuos envases plasticos (Residuos domésticos)	1.22	ton	EIA informa que los residuos domésticos corresponden principalmente a envases de cartón, papel y plástico. Flow

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

				Openlca: Packaging waste, plastic. Categoría: Waste/ecopoints 97, CH.
--	--	--	--	---

- Pretratamiento:

**Tabla 10.49.** Inputs ingresados en OpenLCA para etapa de pretratamiento (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Pretratamiento	Ácido cítrico	14	ton	Información obtenida directamente de EIA. Se utiliza para la limpieza de membranas. Flow Openlca: Citric acid. Categoría: Organic chemicals/nan.
	EDTA	14	ton	Información obtenida directamente de EIA. Se utiliza para la limpieza de membranas. Flow Openlca: EDTA, ethylenediaminetetraacetic acid [GLO]   market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
	Lauril sulfato sódico	4	ton	Información obtenida directamente de EIA. Se utiliza para la limpieza de membranas. Flow Openlca: Sodium lauryl sulfate. Categoría: Emission to air/high population density.
	Hidróxido de sodio	3	ton	Información obtenida directamente de EIA. Se utiliza para la limpieza de membranas. Flow Openlca: Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]   market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

	Acido clorhídrico (HCL)	9	ton	Información obtenida directamente de EIA. Se utiliza para la limpieza de membranas. Flow Openlca: Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state [RER]   market for   Cut-off, S - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
	Cloruro férrico	81	ton	EIA informa sobre su utilización, la cantidad es calculada en base a producción (anexo 1). Flow Openlca: Iron chloride. Categoría: Materials production/Inorganic chemicals.
	Ácido sulfúrico	185	ton	EIA informa sobre su utilización, la cantidad es calculada en base a producción (anexo 1). Flow Openlca: Sulfuric acid [GLO]   market for   Cut-off - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
	Bisulfito de sodio	341	ton	EIA informa sobre su utilización, la cantidad es calculada en base a producción (anexo 1). Flow Openlca: Sodium hydroxen sulfite [GLO]   market for   Cut-off - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
	Energía eléctrica	5026050	kWh	Información obtenida mediante estimaciones y bibliografía. Fuente energética es simulada según información del SEN.
	Filtros	14.4	ton	Información obtenida directamente de EIA. Se utilizan en el pretratamiento. Flow Openlca: Scellulose

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

				filters, at plant/RER U (ACYVIA). Categoría: Others.
--	--	--	--	--

**Tabla 10.50.** Outputs ingresados en OpenLCA para etapa de pretratamiento (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Pretratamiento	Arenas	158.16	ton	Información obtenida directamente del EIA. Openlca: Sand. Categoría: Resources from ground/Non-renewable material resources from ground.
	Residuos peligrosos	7.2	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Hazardous waste, DK. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Residuos industriales no peligrosos	12	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Waste, industrial. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Aguas servidas	2.43	kg	EIA informa que se generan 0.02 L por día de aguas servidas, software mide en masa, al no tener mayor información sobre aguas servidas se usa densidad igual a 1 kg/m <sup>3</sup> , obteniendo valor utilizado. Openlca: Water (wastewater) [Water]. Categoría: Unmapped flows/ Emission output to freshwater - Gabi.
	Residuos envases papel y cartón (Residuos domésticos)	1.22	ton	EIA informa que los residuos domésticos corresponden principalmente a envases de cartón, papel y plástico. Flow Openlca: Packaging waste, paper and board. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

	Residuos envases plasticos (Residuos domésticos)	1.22	ton	EIA informa que los residuos domésticos corresponden principalmente a envases de cartón, papel y plástico. Flow Openlca: Packaging waste, plastic. Categoría: Waste/ecopoints 97, CH.
--	--	------	-----	---

- Osmosis inversa:

*Tabla 10.51. Inputs ingresados en OpenLCA para etapa de osmosis inversa (Fuente: Elaboración propia).*

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Osmosis inversa	Doxido de carbono	555	ton	EIA informa sobre su utilización, la cantidad es calculada en base a producción (anexo 1). Flow Openlca: Scarbon dioxide, liquid [RER]   market for   Cut-off - Copied from Ecoinvent - GLO. Categoría: Others/Ecoinvent cut-off S copy.
	Energía eléctrica	44676000	kWh	Información obtenida mediante estimaciones y bibliografía. Fuente energética es simulada según información del SEN.
	Membranas osmosis inversa	28	ton	Información obtenida directamente de EIA. Se utilizan directamente en proceso de desalinización. Flow Openlca: Polyamide 6.6 fibres (PA 6.6). Categoría: Materials production/Plastics.
	Cal	410.3	ton	Información obtenida a partir de bibliografía, EIA de la planta desalinizadora menciona su uso pero no la cantidad. Flow: Calcium hydroxide. Categoría: Organic chemical/nan.

**Tabla 10.52.** *Outputs ingresados en OpenLCA para etapa de osmosis inversa (Fuente: Elaboración propia).*

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Osmosis inversa	Aluminio (salmuera)	206.56	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Aluminium. Categoría: Emission to water/ocean.
	Arsénico (salmuera)	10.32	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Arsenic. Categoría: Emission to water/ocean.
	SAAM (salmuera)	309.84	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: C.I. Methylene blue. Categoría: Emission to water/ocean.
	Cadmio (salmuera)	10.32	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Cadmium. Categoría: Emission to water/ocean.
	Cromo (salmuera)	206.56	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Chromium.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

				Categoría: Emission to water/ocean.
	Cobre (salmuera)	61.96	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Copper. Categoría: Emission to water/ocean.
	Cianuro (salmuera)	20.65	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Cyanide. Categoría: Emission to water/ocean.
	Fluoruro (salmuera)	123.93	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Fluoride. Categoría: Emission to water/Emissions to sea water.
	Plomo (salmuera)	20.65	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Lead. Categoría: Emission to water/ocean.
	Manganeso (salmuera)	82.62	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Manganese. Categoría: Emission to water/ocean.

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

	Molibdeno (salmuera)	10.32	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Molybdenum. Categoría: Emission to water/ocean.
	Niquel (salmuera)	82.62	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Nickel. Categoría: Emission to water/ocean.
	Aceites y grasas (salmuera)	7229.62	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Oils, unspecified. Categoría: Emission to water/ocean.
	Solidos en suspensión (salmuera)	14459.2	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Suspended solids, unspecified. Categoría: Emission to water/ocean.
	Estaño (salmuera)	20.65	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Tin. Categoría: Emission to water/ocean.
	Zinc (salmuera)	103.28	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

				océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Zinc. Categoría: Emission to water/ocean.
	Sulfuros (salmuera)	103.28	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Sulfide. Categoría: Emission to water/ocean.
	Hidrocarburos (salmuera)	413.12	ton	EIA informa cantidad máxima de este elemento que se puede descargar en el océano . Por lo tanto, este es considerado el peor caso. Flow Openlca: Hydrocarbons, unspecified. Categoría: Emission to water/ocean.
	Arenas	158.16	ton	Información obtenida directamente del EIA. Openlca: Sand. Categoría: Resources from fround/Non-renewable material resources from ground.
	Residuos peligrosos	7.2	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Hazardous waste, DK. Categoría: Waste/ecopoints 97, CH.
	Residuos industriales no peligrosos	12	ton	Información obtenida directamente de EIA. Flow Openlca: Waste, industrial. Categoría: Waste/ecopoints 97, CH.
	Aguas servidas	2.43	kg	EIA informa que se generan 0,02 L por día de aguas servidas, software mide en masa, al no tener mayor información sobre aguas

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

				servidas se usa densidad igual a 1, obteniendo valor utilizado. Openlca: Water (wastewater) [Water]. Categoría: Unmapped flows/ Emission output to freshwater - Gabi.
	Residuos envases papel y cartón (Residuos domésticos)	1.22	ton	EIA informa que los residuos domésticos corresponden principalmente a envases de cartón, papel y plástico. Flow Openlca: Packaging waste, paper and board. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.
	Residuos envases plasticos (Residuos domésticos)	1.22	ton	EIA informa que los residuos domésticos corresponden principalmente a envases de cartón, papel y plástico. Flow Openlca: Packaging waste, plastic. Categoría: Waste/ ecopoints 97, CH.

- Tanque almacenamiento:

**Tabla 10.53.** Inputs ingresados a OpenLCA para etapa de tanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Tanque almacenamiento	Energía eléctrica	788400	kWh	Información obtenida mediante estimaciones y bibliografía. Fuente energética es simulada según información del SEN.

- Transporte agua desalinizada no swap (500 l/s a faena):

“Estudio de evaluación de impacto ambiental de planta desalinizadora por osmosis inversa mediante el análisis del ciclo de vida”

**Tabla 10.54.** *Inputs ingresados a OpenLCA para etapa de transporte de agua desalinizada a faena no swap (Fuente: Elaboración propia).*

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Transporte agua no swap	Energía eléctrica	51990600	kWh	Información obtenida mediante estimaciones y bibliografía. Fuente energética es simulada según información del SEN.

- Transporte agua desalinizada swap (330 l/s a faena y 170 l/s a comunidad):

**Tabla 10.55.** *Inputs ingresados a OpenLCA para etapa de transporte de agua desalinizada swap (Fuente: Elaboración propia).*

Etapa	Nombre	Cantidad	Unidad	Descripción
Transporte agua swap	Energía eléctrica	45175320	kWh	Información obtenida mediante estimaciones y bibliografía. Fuente energética es simulada según información del SEN.