



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**USO DE ESTANQUES DE EVAPORACIÓN PARA TRATAR EL RECHAZO
PROVENIENTE DE UNA PLANTA DESALINIZADORA (ANÁLISIS
ENERGÉTICO, AMBIENTAL Y ECONÓMICO).**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

PAULA VALENTINA PINTO POZO

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

PROFESORA CO-GUÍA:
MARIANA BRÜNING GONZÁLEZ

COMISIÓN:
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

USO DE ESTANQUES DE EVAPORACIÓN PARA TRATAR EL RECHAZO PROVENIENTE DE UNA PLANTA DESALINIZADORA (ANÁLISIS ENERGÉTICO, AMBIENTAL Y ECONÓMICO).

La larga sequía experimentada en Chile ha impactado fuertemente a diversos sectores de la industria nacional, por lo cual se han tenido que buscar soluciones tanto en la optimización de procesos, como en la obtención del recurso hídrico. Dado que Chile es un país costero, las plantas desalinizadoras de extracción de agua de mar han surgido como una opción viable para varias empresas. Sin embargo, este proceso genera un residuo denominado rechazo que generalmente es vertido al mar; este fluido posee altas concentraciones de sales por lo que afecta al ecosistema marino en los alrededores de las zonas de descarga.

Este trabajo de título busca evaluar el proyecto de uso de estanques de evaporación como método para tratar la salmuera proveniente de las plantas desalinizadoras desde un punto de vista energético, ambiental y económico. Se evalúa la tasa de evaporación y sus impactos en el proceso, se caracterizan las sales posibles de extraer como subproducto del proceso de desalinización del agua, se describe el impacto ambiental que tendría el proyecto y se evalúa la inversión inicial versus las ganancias obtenidas por la venta de sales. Para este fin, se utiliza como caso de estudio la planta desalinizadora que es parte del Proyecto de Ingeniería Complementaria de Minera Los Pelambres.

La metodología para llevar a cabo este trabajo de título parte con la selección del lugar donde se instalan los estanques (Fundo El Mollar, Los Vilos, Chile), luego se divide en tres grandes aspectos: energético, ambiental y económico. Para la parte energética, a partir de los datos meteorológicos del área seleccionada, se calcula la tasa de evaporación, la cual da en promedio 6.53 [mm/día], y se dimensionan los estanques que alcanzan una superficie total de 1.6 [km^2]. Posteriormente, se obtiene la cantidad de sales producidas al año (42,000 [Ton] aprox.) y la temperatura máxima que alcanza la salmuera en cada estanque. A continuación, para el estudio ambiental se caracteriza la zona a intervenir según la clasificación TEEB y luego se compara la cantidad de iones que se descargarían al mar, considerando que un 14% será enviado a los estanques de evaporación. En cuanto al ámbito económico, se estudia la inversión inicial, la cual alcanza los 4,300 millones de pesos; los beneficios por venta de sales, cuyo valor aproximado es de 1,420 millones de pesos; y se hace un flujo de caja a 15 años donde se obtiene un VAN de 12,900 millones de pesos aproximadamente.

Finalmente, el proyecto resulta ser viable en el sentido de lograr la evaporación del agua y obtener sales, reduciendo el impacto de la salinidad en el medio ambiente además de la posibilidad de venta de las sales. Pero no es rentable económicamente (como proyecto puro) debido al alto costo de la logística para la venta de estas últimas. Cabe destacar que, al tratarse un porcentaje menor de salmuera, no resulta un proyecto que pueda reproducirse en mayor escala.

*Dedicada a
Eliana Garrido y Mario Pozo*

Gracias totales

Agradecimientos

Primero que todo, quisiera agradecer a mis profesores Rubén Fernández, Mariana Brüning y Ramón Frederik, por aceptar un tema diferente y apoyarme a lo largo de todo el año con muy buena disposición, en especial al profesor Rubén Fernández quien me guió, ayudó y estuvo pendiente de mis avances constantemente, por su simpatía y compromiso.

Quisiera agradecer a mi familia por la oportunidad de hacer el camino largo entrando primero a bachillerato para que pudiera estudiar la carrera que yo quería en la universidad que yo quería. Por su apoyo incondicional durante estos casi 8 años de estudio, por aguantar que desapareciera y me dedicara exclusivamente a estudiar, los momentos de estrés máximo, las explosiones de frustración y por compartir cada alegría conmigo. Muchas gracias por su apoyo, cariño y compañía en este proceso.

Me gustaría mencionar a todos aquellos que me ayudaron en la realización de mi memoria, mis amigos químicos: Rodrigo Gómez, Daniela Morales, Ariela Ramos y Felipe Andrade, quienes me aportaron material y consejos para estudiar la producción de sales precipitadas. A mi madre Veronica Pozo que me ayudó con mapas, movió contactos para que yo pudiera interiorizarme de mejor manera con lo que era una evaluación ambiental, y en conjunto con Cristián Carrillo consiguieron los datos del fundo donde decidí instalar mis estanques. A Gabriel Ramírez por entregarme información y asesorarme sobre la venta de sales; y a mi hermana, Francisca Pinto, por ayudarme con la corrección de forma de mi memoria, a ella y a su pololo Felipe Tejada por darme un espacio en su hogar, regalóme y recibirme cuando estaba en colapso máximo.

Nombrar también al equipo de futbolito de iiiiiiingeniería, por las alegrías, la adrenalina de los JOE y los TIF, los paseos a la sierra, la amistad, y todos los aprendizajes que trae consigo el deporte, trabajar en equipo, humildad, esfuerzo, dedicación, disciplina, etc.

Quisiera agradecer especialmente a mis amigos, Catalina Peña, Paula Silva y Leonardo garrido, el dream team de mi paso por mecánica, por la ayuda con mi memoria, todas las tramoschadas juntos, las anécdotas, los trabajos y el apoyo que me han dado, especialmente durante mi último año de universidad, pasamos de ser compañeros de grupo a grandes amigos. A Ignacio Calderón, primero mi ayudante, luego el amigo del amigo, y finalmente uno de mis mejores amigos; Catalina González, él mejor regalo que me ha dado el fútbol, una amiga como tú; a Catalina Rojas, la mayor ganancia de haber pasado por bachillerato, compañera de tantas batallas y tantas chancherías. A todos ustedes muchísimas gracias por ser parte de mi vida y por haberme acompañado en tantos procesos de crecimiento a lo largo de todos estos años.

Por último, pero no menos importante, a quien fue mi compañero, mi partner, mi mejor amigo y cómplice durante muchos años, a Pablo Pogorelow y a su familia, por el cariño, la contención, la preocupación, los cuidados y los ánimos durante todo ese tiempo. Sin duda fueron una parte muy importante de mi vida, no solo en lo que respecta a los estudios.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Alcances	2
2. Antecedentes	3
2.1. Definiciones:	3
2.2. Contexto a nivel nacional y mundial:	3
2.3. Métodos de desalinización:	4
2.4. Funcionamiento de una planta desalinizadora por ósmosis inversa:	5
2.5. Tratamientos a la salmuera:	7
2.6. Problemas ambientales de la salmuera:	8
2.7. Estanques de evaporación:	9
2.8. Descripción del caso de estudio:	10
2.8.1. Línea de base del proyecto INCO	11
3. Marco Metodológico	12
3.1. Metodología	12
3.1.0.1. Análisis Energético	12
3.1.0.2. Análisis Ambiental	14
3.1.0.3. Análisis Económico	14
3.2. Memoria de Cálculo	15
3.2.1. Tasa de evaporación	15
3.2.2. Balance de energía	16
3.2.3. Decantación de sales	18
3.2.4. Dimensionamiento de pipeline	18
4. Resultados	21
4.1. Análisis Energético	22
4.1.1. Caracterización de las sales	22
4.1.2. Dimensionamiento de los estanques	23
4.1.3. Balance de energía	26
4.2. Análisis Ambiental	28
4.2.1. Servicios Ecosistémicos	28
4.2.1.1. Evaluación del los Ecosistemas del Milenio	28
4.2.1.2. Clasificación Internacional Común de Servicios Ecosistémicos	29

4.2.1.3.	La Economía de Ecosistemas y Biodiversidad: Fundamentos Ecológicos y Económicos	30
4.2.1.4.	Caracterización del área a intervenir	31
4.2.2.	Comparación de la concentración del agua de mar	32
4.3.	Análisis Económico	33
4.3.1.	Costos	34
4.3.2.	Beneficios	35
4.3.3.	Evaluación costos-beneficios	36
5.	Discusión	37
5.1.	Análisis Energético	37
5.2.	Análisis Ambiental	42
5.2.1.	Servicios Ecosistémicos	42
5.2.2.	Comparación de la concentración del agua de mar	43
5.3.	Análisis Económico	47
6.	Conclusiones	50
	Bibliografía	52
	Anexo A. Antecedentes	56
A.1.	Ubicación de la planta de MLP	56
A.2.	Composición del agua	58
	Anexo B. Metodología	59
B.1.	Análisis energético	59
	Anexo C. Resultados	64
C.1.	Análisis Económico	64

Índice de Tablas

3.1.	Entalpías de disolución de sales	17
4.1.	Resumen de datos meteorológicos del lugar	22
4.2.	Características de las sales	23
4.3.	Tasa de evaporación y área total necesaria del estanque por mes.	23
4.4.	Tiempo en el que comienzan a decantar las sales	24
4.5.	Tiempos de residencia para cada sal.	25
4.6.	Área de cada estanque	25
4.7.	Cantidad de sal producida por estanque al mes	27
4.8.	Temperaturas de estabilización de la salmuera	27
4.9.	Comparación de la concentración de las sales en el mar.	32
4.10.	Resumen de cotizaciones.	35
4.11.	Beneficios económicos por venta de sales	35
4.12.	Años de vida útil	36
4.13.	Parámetros de viabilidad del proyecto.	36
5.1.	Tiempo en el que comienza a decantar cada sal, con la nueva tasa de evaporación.	40
5.2.	Tiempos de residencia con la nueva tasa de evaporación.	40
5.3.	Cantidad de sales por estanque con la nueva tasa de evaporación	41
5.4.	Temperaturas de estabilización de la salmuera luego de la iteración con la nueva tasa de evaporación.	42
5.5.	Beneficios económicos por venta de sales luego del aumento de la tasa de evaporación.	48
5.6.	Resumen de la estimación de costos del proyecto.	49

Índice de Ilustraciones

2.1.	Infografía del funcionamiento de una planta desalinizadora extraído de Acciona.	6
2.2.	Composición del rechazo en porcentajes.	11
3.1.	Mapa conceptual de la metodología.	12
3.2.	Esquema del balance de energía en el estanque de evaporación.	16
3.3.	Rango de velocidades para tuberías según CRANE [32].	18
4.1.	Ubicación de la planta desalinizadora y futuros estanques de evaporación (extraída de Google Earth el 13 de septiembre de 2020).	21
4.2.	División del área en los distintos estanques de evaporación, imagen extraída de GoogleEarth.	26
4.3.	Relación entre servicios ecosistémicos y el bienestar humano [36].	29
4.4.	Modelo de la cascada de Potschin y Haines-Young [37].	30
4.5.	Servicios ecosistémicos provistos por el área seleccionada según datos de la evaluación ambiental del proyecto INCO [41]; [42].	32
4.6.	Pipeline desde la planta desalinizadora hasta los estanques.	33
5.1.	Comparación de la tasa de evaporación original y posterior a la primera iteración.	39
5.2.	a) Cadena trófica por individuo. b) Cadena trófica por categoría	46
A.1.	Mapa de las instalaciones de Minera Los Pelambres, extraído del documento de evaluación ambiental	56
A.2.	Imagen satelital de Puerto Punta Chungo donde está en construcción la planta desalinizadora de MLP	57
A.3.	Resultados del software que analiza el agua que se extraerá del mar y la posible composición del rechazo que se devolverá al mar.	58
C.1.	Pipeline desde la planta desalinizadora hasta los estanques de evaporación. . .	65
C.2.	Avalúo Fiscal Fundo El Mollar.	66
C.3.	Cotización de tuberías Vinilit.	67
C.4.	Cotización de bombas Wellford.	68
C.5.	Cotización de bombas Masdaf.	69
C.6.	Cotización de válvulas Fitvalv.	70
C.7.	Cotización de válvula de alivio en Megacenter.	71
C.8.	Cotización de geomembranas y geotextiles.	72
C.9.	Cotización de caliza en Aceros CAP.	73
C.10.	Flujo de caja parte I.	74
C.11.	Flujo de caja parte II.	75
C.12.	Flujo de caja con mayor tasa de evaporación, parte I.	76
C.13.	Flujo de caja con mayor tasa de evaporación, parte II.	77

Capítulo 1

Introducción

El agua dulce es un elemento vital para el ser humano, sin embargo, es un recurso que año tras año se hace más escaso; se puede obtener por medio de glaciares, ríos, acuíferos subterráneos y recolección de aguas lluvias, siendo estas últimas las de más fácil acceso. Chile acumula once años de sequía debido a la falta de lluvias, llegando al punto de declarar emergencia agrícola en más de 133 municipios rurales de las zonas norte y centro del país [1]. Según algunos estudios, se estima que para el año 2040 Chile será uno de los 25 países con mayor estrés hídrico del planeta y dependiendo de las lluvias del presente año es que se evaluará un posible racionamiento de agua para los años venideros [2].

El uso del agua en el país es liderado por el sector forestal, quienes ocupan un 57 % de esta, le sigue el sector agrícola con un 37 % y en último lugar se encuentra el agua potable con solo un 2 % [2]. Por otro lado, la industria y la minería también son grandes consumidores del recurso hídrico y, generalmente en el caso de las empresas mineras, están ubicadas en zonas con poca disponibilidad de agua, lo anterior las ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes de obtención del recurso hídrico, siendo la opción más atractiva la desalinización de agua de mar. Actualmente en Chile existen 24 plantas desalinizadoras de agua de mar, de las cuales el 65,2 % se encuentra en manos de la minería y otras industrias [3].

Hoy en día en el país se producen 5.570 litros de agua por segundo a partir de plantas desalinizadoras y sistemas de impulsión de agua de mar, y se proyecta un crecimiento de un 160 % en los próximos cinco años. Además, existen ya 22 proyectos de plantas en diferentes etapas de desarrollo [3], uno de ellos es el Proyecto de Infraestructura Complementaria perteneciente a Minera Los Pelambres, proyecto en el que trabajó la alumna en su tercera práctica profesional y el cual motivó el tema de este trabajo de título.

Si bien las plantas desalinizadoras parecen ser una muy buena alternativa para Chile, debido a su geografía y grave problema de escasez hídrica, estas presentan algunos inconvenientes tanto económicos, por sus aún altos costos, como ambientales, debido a que el residuo que generan tiene una alta concentración de sales y dependiendo de donde se deposite o el tratamiento al que se someta puede dañar diferentes ecosistemas.

Existen diversos métodos para lograr la desalinización y posterior manejo de residuos del proceso, en particular, la planta que se estudiará utiliza ósmosis inversa y descarga su salmuera al mar, por lo que se evaluará la posibilidad de usar estanques de evaporación para el rechazo, buscando así obtener sales como subproducto de la desalinización y evitar la contaminación de los ecosistemas marinos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Evaluar el uso de estanques de evaporación como tratamiento para la salmuera producida por las plantas desalinizadoras en Chile desde un punto de vista energético, ambiental y económico.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la tasa de evaporación del proceso y sus impactos en el dimensionamiento de los estanques y la temperatura de estabilización del fluido.
- Determinar las sales y su tasa de producción a partir de la evaporación del rechazo.
- Describir el impacto ambiental del rechazo en el océano y de la instalación de los estanques.
- Evaluar costos y beneficios económicos de la instalación de estanques de evaporación.

1.2. Alcances

Como caso de estudio, se utilizará la planta desalinizadora que se está construyendo en el puerto Punta Chungo, Los Vilos, región de Coquimbo, Chile. Esta planta es parte del proyecto de Ingeniería Complementaria, desde ahora también llamado INCO, de Minera Los Pelambres perteneciente a la empresa Antofagasta Minerals.

El presente trabajo de título es una evaluación de un proyecto de ingeniería, el cual se dividirá en tres grandes aspectos: energético, ambiental y económico. En el análisis energético se estudiará la tasa de evaporación, el dimensionamiento de los estanques, la transferencia de calor del proceso y se determinarán las sales que se producirán. En cuanto al aspecto ambiental se analizará el territorio a intervenir según alguna clasificación de los servicios ecosistémicos, se revisará la salinidad del rechazo y las consecuencias de reducir la cantidad de salmuera que se descarga en el océano. Respecto al ámbito económico, se hará una evaluación de costos de instalación de los estanques y su respectivo pipeline, los beneficios del proyecto por venta de sales y luego se hará un balance entre ambos.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Definiciones:

Primero que todo, es necesario esclarecer la diferencia entre desalar y desalinizar; según la RAE el concepto **desalar** significa “*Quitar la sal a algo, como a la cecina, al pescado, etc.*” [4] y la palabra **desalinizar** significa “*Quitar la sal del agua del mar o de las aguas salobres, para hacerlas potables o útiles para otros fines*” [5]. Sin embargo, a lo largo de este informe se utilizaran indistintamente para hablar del proceso de extracción de sal del agua de mar.

Por otro lado, se define como **salmuera** aquella solución que contenga más de 30.000 partes por millón (ppm) de sólidos totales disueltos (TDS) y como agua salada si contiene entre 3.000 y 20.000 ppm de TDS. [6]. Para efectos del presente documento se utilizará la palabra “salmuera” y/o “rechazo” como sinónimos para referirse al desecho de agua de las plantas desalinizadoras que contiene altas concentraciones de sales (más de 20.000 ppm) y algunos componentes químicos, orgánicos y metales pesados que se le agregan durante el tratamiento.

Otro concepto que es necesario tener claro es el de **servicio ecosistémico**, para el Ministerio de Medio Ambiente de Chile los servicios ecosistémicos (desde ahora también llamados SS.EE.) son definidos como “*la contribución directa e indirecta de los ecosistemas al bienestar humano*” [7].

Un **ecosistema**, según la Real Academia Española, es “*una comunidad de los seres vivos cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos de un mismo ambiente*” [8].

2.2. Contexto a nivel nacional y mundial:

El océano y los mares de agua salada representan el 97% de toda el agua que hay en el planeta, mientras que el restante corresponde a agua dulce [9]. Esta última se encuentra principalmente en estado sólido en polos y montañas, otro tanto está presente en acuíferos subterráneos y un porcentaje menor es el que escurre por cuencas hidrográficas permitiendo el consumo humano. Sin embargo, aproximadamente el 70% de las aguas extraídas de los ríos, lagos y acuíferos se utilizan para riego [10].

Según la Organización de Naciones Unidas para el año 2050 se espera que al menos un 25% de la población mundial viva en un país afectado por escasez de agua dulce [10], en contraposición con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 dispuesto por la misma

institución, el cual busca “*garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos*”. Los principales factores que dificultan el cumplimiento de este objetivo son el aumento de la población, la creciente contaminación en ríos y el cambio climático [11].

Una forma de contrarrestar los problemas hidrológicos y cumplir con el ODS6 es el uso de plantas desalinizadoras. Hoy en día existen 15.906 plantas desalinizadoras operando en el mundo, con un 48% de ellas ubicadas en Medio Oriente y el Norte de África produciendo alrededor de 95 millones de $[m^3/día]$ de agua para consumo humano. Por otro lado, se estima que se generan alrededor de 142 millones de $[m^3/día]$ de salmuera en el mundo [6].

Poniendo el foco ahora en Chile, según el artículo 4.8 de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, éste se considera un país altamente vulnerable frente al cambio climático, dado que cuenta con áreas costeras bajas, zonas áridas y semi áridas, zonas con cobertura forestal, zonas propensas a los desastres naturales, expuestas a la sequía y desertificación, alta contaminación atmosférica urbana, y una economía que depende en gran medida de la producción y explotación de materias primas como el cobre [12].

Si a lo mencionado en el párrafo anterior se le suma la evidencia de 11 años con pocas lluvias en el país [1] se concluye que la demanda de agua dulce, tanto para el consumo humano como para los procesos industriales, es cada vez más difícil de suplir.

Al igual que otros países del mundo, en Chile tanto la industria como el estado han visto en las plantas desalinizadoras una opción para sobrellevar el problema de escasez hídrica. Actualmente en el país hay 24 plantas desalinizadoras funcionando y existen 22 proyectos de plantas en diferentes etapas de desarrollo [3]. Además, en el presente año se espera inaugurar la primera planta desalinizadora estatal del país; esta planta tiene por objetivo suministrar agua potable a 220 mil personas en Tierra Amarilla, Copiapó, Caldera y Chañaral, con una capacidad de producción de 450 $[l/s]$ ampliables en una segunda y tercera etapa hasta 1.200 $[l/s]$ [13].

2.3. Métodos de desalinización:

Existe más de un método para separar el agua salada y transformarla en agua con condiciones óptimas para su uso y consumo. Los procesos más comunes son:

- **Desalinización térmica:** imita el proceso natural de evaporación y condensación del agua. Existen 3 tipos de desalación térmica: compresión de vapor (VC), destilación multiefecto (MED) y destilación flash multietapa (MSF) [14].
- **Destilación:** al igual que el proceso anterior, se basa en la evaporación y condensación del agua. Es un método de varias etapas, en las cuales la presión y temperatura descienden.
- **Criocongelación:** tecnología de separación que utiliza bajas temperaturas para disgregar la solución acuosa vía congelación de cristales de sal [15].
- **Electrodiálisis:** proceso de separación electroquímico donde los iones se transfieren a través de membranas de intercambio iónico por medio de un campo de corriente continua [16].

- **Ósmosis inversa:** método de separación a través de membranas semipermeables en el que una solución menos concentrada se desplaza hacia otra con mayor concentración mediante diferencia de potencial. Para lograr esto último, se aplica una presión externa mayor a la osmótica [16]. La ósmosis inversa es la tecnología más utilizada en el mundo con una participación del 44 % en la capacidad de producción mundial de agua desalinizada. El éxito de este método se debe a que cada vez se hace más económico y requiere menos energía que los métodos termales [17].

2.4. Funcionamiento de una planta desalinizadora por ósmosis inversa:

La desalinización requiere varios procesos y etapas que dependerán de la calidad del agua que se desea obtener. A continuación, se mencionarán los procedimientos que normalmente se realizan en una planta desaladora de ósmosis inversa y en la figura 2.1 se puede observar una infografía extraída de la empresa Acciona [18] donde se muestra el proceso de desalación:

1. **Captación del agua:** primero que todo, se obtiene el agua bruta, ya sea marina o proveniente de algún acuífero subterráneo, lago o río con alto contenido salino. Existen torres de extracción de agua que por medio de tuberías la transportan a un estanque de almacenamiento para posteriormente ser bombeada a las instalaciones de la planta [19].
2. **Pretratamiento:** generalmente se aplica un coagulante (cloruro férrico) para formar agregados de partículas que pronto serán decantados. Luego, se agregan biocidas, encargados de eliminar la carga biológica del agua, y desinfectantes [19].
3. **Procesos de filtrado:** el fluido pasa por una serie de filtros de doble capa, generalmente de arena o carbón natural, donde la mayor parte de la materia en suspensión es retenida. En el segundo proceso de filtración, denominado ultrafiltración, el agua es impulsada a mayor presión a través de filtros multicapa aumentando la calidad del fluido. Finalmente, pasa por filtros de cartucho de 15 y 10 [μm] [19].
4. **Regulación del agua:** Tras los procesos de filtrado, es necesario otorgar al agua las condiciones fisicoquímicas óptimas para pasar a las membranas de ósmosis inversa. Para esto se declora el agua mediante la adición de ácido sulfúrico (así se disminuye el ph del agua) y se le agregan anti-incrustantes. Notar que el ácido sulfúrico es muy peligroso por lo que las cañerías deben estar recubiertas de hexametáfosfato sódico para evitar posibles fugas [19].
5. **Ósmosis inversa:** bombas de alta presión impulsan el agua hacia las membranas generando el proceso de ósmosis inversa. A partir de esta etapa se obtiene entre un 40 % y 50 % de agua de producto (desalinizada) y un 55 % a 60 % de agua con altas concentraciones de sales también llamada salmuera o rechazo [19].
6. **Post-tratamiento:** al agua de producto proveniente de la ósmosis inversa, se le agrega una base (hipoclorito de sodio) para estabilizar su ph y en algunas ocasiones es remineralizada dependiendo del uso que se le vaya a dar. Posteriormente, esta agua almacenada en grandes estanques será bombeada a la red de abastecimiento [19].

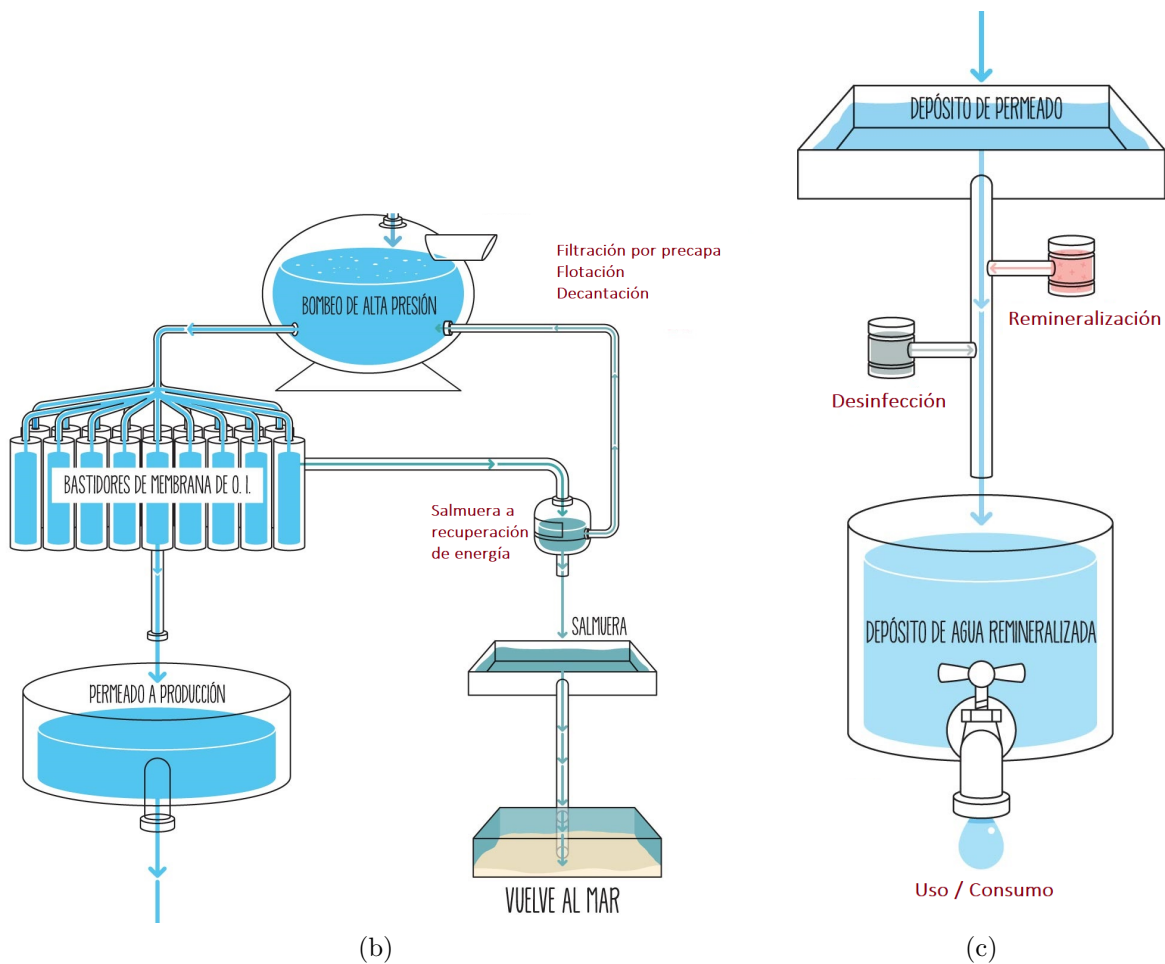
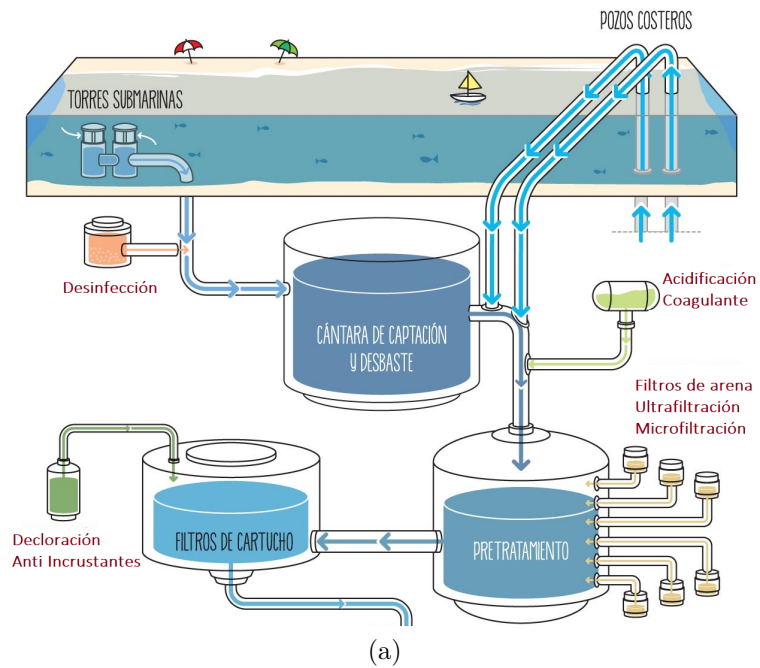


Figura 2.1: Infografía del funcionamiento de una planta desalinizadora extraído de Acciona.

2.5. Tratamientos a la salmuera:

La elección del tratamiento adecuado dependerá de diversos factores, entre ellos: cantidad, calidad y composición de la salmuera; la ubicación geográfica del sitio en cuestión; disponibilidad del sitio; admisibilidad de la opción; aceptación pública; costos de inversión y operación; y la capacidad de la instalación para una posible expansión futura [20]. A continuación, se mencionaran los tratamientos más comunes:

- **Descarga de aguas superficiales:** este método incluye la descarga directa de la salmuera al océano, río, bahía o lago del cual se extrae en primer lugar el agua. La descarga directa se utiliza en un 90 % de las plantas cercanas al mar y para que no afecte mayormente al ecosistema acuático la salmuera es previamente diluida y/o se disuelve rápidamente por el uso de difusores. Los costos de la descarga directa del rechazo son de US\$0.05/ m^3 a US\$0.30/ m^3 de salmuera [20].
- **Descarga en alcantarillado:** consiste en descargar el rechazo en el sistema de recolección de aguas residuales más cercano. Es utilizado en plantas de agua salada no marina a pequeña escala debido al daño que la salmuera podría producir en la planta receptora de aguas residuales, tanto porque al agregarle otras sales y compuestos dificulta el tratamiento de las aguas, como por la infraestructura y la calidad del agua al final del proceso. Los costos de este tratamiento van desde los US\$0.32/ m^3 a los US\$0.66/ m^3 [20].
- **Inyección en pozos profundos:** en este caso se inyecta la salmuera en un acuífero subterráneo adecuadamente aislado para no afectar acuíferos cercanos de agua dulce. Este método se utiliza en plantas de desalinización de agua salada no marina, los tamaños y las profundidades de estos pozos varían entre 500 y 1.500 [m] y los costos de este sistema varían entre US\$0.54/ m^3 y US\$2.65/ m^3 [20].
- **Aplicación en tierra:** se utiliza como riego por aspersión de salmuera en plantas y pastos tolerantes a la sal. Como cada planta tiene una tolerancia a la salinidad distinta, la cantidad de salmuera que se puede usar dependerá de las características del suelo, de las especies y del mismo rechazo. Puede tener efectos negativos en aguas subterráneas, por lo que la elección de este método estará asociada a diversos factores como el clima, tasa de percolación, disponibilidad de la tierra, calidad y salinidad de las aguas bajo tierra, tolerancia de la salinidad de las plantas, entre otros. Los costos de este tratamiento van entre US\$0.74/ m^3 y US\$1.95/ m^3 [20].
- **Estanques de evaporación:** este método consiste en cuencas de tierra revestidas y poco profundas en las que la salmuera se evapora lentamente mediante energía solar. Una vez que el agua dulce se ha evaporado, las sales y minerales precipitan en cristales que periódicamente se cosechan y retiran del sitio. Este tratamiento es factible en la medida que se asegure el revestimiento de los estanques para evitar la percolación del agua sobre acuíferos subterráneos de agua dulce. Los costos dependerán de las condiciones climáticas, disponibilidad de tierra, calidad del agua y acuíferos subterráneos, pero oscilan entre US\$3.28/ m^3 y US\$10.04/ m^3 [20].

2.6. Problemas ambientales de la salmuera:

Como se mencionó anteriormente, la relación de recuperación de agua de las plantas desalinizadoras por ósmosis inversa en general es del 40 %, por lo tanto el 60 % se convierte en salmuera. La composición de esta última dependerá de la composición del agua original y de los elementos que se le agreguen durante el proceso de desalinización como: hipoclorito de sodio ($NaOCl$), cloruro férrico ($FeCl_3$), cloruro de aluminio ($AlCl_3$), hexametáfosfato de sodio ($Na_6P_6O_{18}$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido clorhídrico (HCl) [21].

El impacto de la salmuera en el medio ambiente dependerá de la forma en la que se descargue o se deseche. Dado que en el caso de estudio, y en general en el mundo, se utiliza la descarga directa al mar, el foco estará en las consecuencias que se puedan generar a partir de este método.

La salmuera de una sola planta puede no afectar significativamente el ambiente marino, sin embargo, múltiples plantas operando en un área cercana por un largo período de tiempo sí puede tener resultados adversos en el ecosistema. Se ha mostrado que un ligero aumento en la salinidad puede ser perjudicial para la vida marina dado que altera el equilibrio osmótico de las especies con su entorno, esto produce la deshidratación celular, una disminución de la presión de turgencia y a largo plazo puede provocar la extinción de algunas especies [20]; [21].

Además, el rechazo proveniente de la planta puede encontrarse a mayor temperatura que la del ambiente oceánico y esto a su vez puede tener distintos efectos contraproducentes en la vida marina, debido a que la toxicidad de metales y químicos se incrementa con el aumento de temperatura, mientras que la solubilidad del oxígeno disminuye [21].

Por otro lado, el área de contacto entre la pluma de salmuera que sale de la tubería y el océano es de gran importancia para la evaluación ambiental, siendo esta la zona más sensible al rechazo [21]. Como la salmuera es más densa que el agua de mar, la pluma tiende a extenderse a lo largo del suelo submarino y no hacia la superficie; por lo que los organismos bentónicos (organismos que habitan el fondo marino) son los que se verían más afectados por este agente externo. Sin embargo, se ha demostrado que comunidades de fitoplancton, invertebrados y peces en el área cercana también pueden verse perjudicados, de estos últimos, los más jóvenes y embriones son los más damnificados. Además, se han detectado disminuciones en la clorofila en las áreas impactadas [22].

Debido a lo anterior, se han establecido una serie de recomendaciones a ser cumplidas para instalar una planta desalinizadora cuya descarga sea directamente al mar, los que se enlistan a continuación:

- El área intervenida no debe tener especies en peligro de extinción ni ecosistemas acuáticos estresados.
- La descarga debe estar ubicada en un lugar con fuertes corrientes subterráneas que permitan la disipación rápida y eficiente de las misma.
- Evitar áreas con rutas o tráfico marítimo para no alterar patrones de mezcla y disminuir los riesgos de daños en el sistema de descarga.
- Conocer la tolerancia de la salinidad del ecosistema que será perturbado.
- Considerar y estudiar la descoloración y bajo contenido de oxígeno.

- Aumento de concentraciones de elementos que resulten perjudiciales, es decir, evaluar la toxicidad del rechazo.

Un mecanismo para disminuir el potencial daño medioambiental es diluir previamente la salmuera con la misma agua de mar o con aguas residuales [22], para efectos de este trabajo se estudiará la posibilidad de utilizar otro método para tratar el rechazo y evitar el daño al ecosistema marino.

De los tratamientos a la salmuera expuestos en la sección anterior, se descartan en primera instancia la descarga en aguas residuales (pues es el mecanismo que se intenta evitar), y la descarga en alcantarillado. Esto último, dado que la cantidad de rechazo que se genera es alta y podría colapsar y/o destruir la infraestructura actual. En cuanto a la inyección en pozos profundos, se excluye considerando que Chile es un país altamente sísmico y podría verse complicado el sistema de inyección provocando una mayor contaminación. Por otro lado, se descarta la aplicación en tierra por las posibles consecuencias en suelos y aguas subterráneas. Finalmente, y teniendo presente que el país cuenta con zonas áridas a las cuales les llega alta radiación solar, con baja humedad y poco pobladas; se propone evaluar en mayor profundidad el uso de estanques de evaporación como tratamiento para la salmuera.

2.7. Estanques de evaporación:

Como se mencionó en la sección 2.5 los estanques de evaporación son cuencas de tierra superficial, revestidas, en las cuales se deja reposar la salmuera para que el agua en ella se evapore naturalmente por energía solar y luego recoger los precipitados. La factibilidad de su uso dependerá de las tasas de evaporación y precipitación, y de la humedad del lugar donde se quieran instalar. Estas piscinas son viables para regiones con una tasa de evaporación anual >1.0 [$m/año$] y una tasa de lluvia < 0.3 [$m/año$]. Además, se requiere un terreno más o menos plano [23].

Usualmente extraer la sal del rechazo involucra mucho tiempo, se requieren casi 6 meses para preparar el depósito de sal sólida por evaporación en una bandeja solar que ocupa una gran superficie de tierra. Por otro lado, hace ya un tiempo se utilizan los estanques solares que poseen un gradiente de salinidad en un estanque construido artificialmente con el fin de alcanzar altas temperaturas debido a la acumulación de energía solar térmica y la prevención simultánea de convección en el estanque [24]. Sin embargo, los estanques recién mencionados no se usan para formar sales, si no que su función es generar energía a partir de un intercambiador de calor, son estanques de mucho menor tamaño y mayor profundidad.

Según estudios experimentales del proceso de evaporación, en primer lugar se separaría la sal común (NaCl), luego se formaría cloruro de potasio en forma de carnelita (KCl), también se podría producir silvinita (una sal mixta entre NaCl y KCl) y bischofita, entre otras sales. Generalmente la temperatura de evaporación natural de la salmuera es de $15[°C]$ y en un proceso de evaporación solar forzada podría alcanzar hasta los $75 [°C]$ [24].

Para la salmuera, mientras mayor sea la temperatura de calentamiento y menor sea la temperatura de evaporación, mayor será la capacidad de evaporación del sistema. Luego, la temperatura de alimentación y la relación de evaporación en la separación líquido-sólido deben ser constantes, mientras que la tasa de evaporación se determina durante el proceso mismo de evaporación [24].

Los estanques de evaporación se construyen según un patrón básico de concentradores poco profundos seguidos por estanques de cristalización, lo más importante de la construcción

de los estanques es el revestimiento que se coloca para evitar la contaminación de suelos o acueductos subterráneos. Un factor de vital importancia para la construcción de estas piscinas es la tasa de evaporación de la salmuera, ya que de esta dependerá el tamaño de los estanques. Si aumenta la tasa de evaporación, el volumen de los estanques se reduce y por ende los costos. Para incrementar la tasa de evaporación se puede elevar la temperatura del agua, ampliar la superficie en contacto con la atmósfera, aumentar la diferencia de presión de vapor entre la superficie y la atmósfera, bajar la tensión superficial de las moléculas de agua, etc. [25].

Los procesos de lagunaje o de piscinas de evaporación pueden ser más eficientes aumentando la superficie de evaporación por sistemas de aspersión o usando áreas verticales de caída descendente donde se utilizan corrientes de aire para favorecer la evaporación [26].

La rentabilidad de la energía solar para tratar el rechazo dependerá de dos factores: si el valor de los productos de la evaporación, además del agua dulce, es mayor al costo de la energía consumida; y la viabilidad de la evaporación forzada, la cual dependerá de la viscosidad de la salmuera y de la rapidez de la evaporación [24].

Algunas oportunidades que puede presentar el uso de estanques de evaporación son: desarrollar acuicultura, producción de betacaroteno, recolección de sales, recuperación de patrones bituminosos y conexión de estanques con gradiente solar para la generación de electricidad por medio de intercambiadores de calor [25].

Los costos de este tratamiento dependerán principalmente del volumen de la salmuera y la concentración de sal que tenga, los costos del terreno, los trabajos en la tierra y el revestimiento que se utilice [23].

2.8. Descripción del caso de estudio:

Se utilizará como caso de estudio la planta desalinizadora de ósmosis inversa (OI) que se está construyendo como parte de las obras marinas de captación de mar y descarga de salmuera del Proyecto INCO de Minera Los Pelambres (desde ahora llamada MLP). Originalmente la planta desalinizadora fue diseñada con una capacidad de producción de 400 [l/s] de agua desalada de calidad industrial. En la medida que avanzó el proyecto esta creció a 850 [l/s], sin embargo, para fines de este trabajo de título se considerará la planta con la capacidad inicial.

Las obras marinas serán dispuestas en la Bahía Conchalí y estarán conectadas por dos tuberías, una para la captación de agua de mar y la otra para la descarga de salmuera sin cambios significativos en su temperatura original. La infraestructura del proyecto se ubicará en el Terminal de Embarque Puerto Punta Chungo perteneciente a la Compañía (ver en anexo figuras A.1 donde se muestran la ubicación de las instalaciones de MLP [27] y figura A.2 para observar una imagen satelital de la locación de la futura planta [27]).

La planta desalinizadora contará con los siguientes sistemas: captación de agua de mar; descarga de agua de rechazo en el mar mediante tuberías y un sistema difusor; pre-tratamiento; unidad de ósmosis inversa; post-tratamiento; y manejo de efluentes y lodos.

Se estima que la planta tendrá una eficiencia promedio de 46 % y que su rechazo será vertido al mar a un caudal promedio anual del orden de 465 [l/s] [27].

En la figura 2.2 es posible ver un resumen, en porcentajes, de la composición de la salmuera que se extrae de la planta desalinizadora. Para revisar en mayor detalle la composición del agua proveniente del mar y el posterior rechazo se puede observar la figura A.3 del anexo.

Cabe destacar que este documento fue extraído el 18 de febrero de 2020 y puede haber sufrido modificaciones a lo largo del tiempo, por lo que es posible que no represente con total veracidad los resultados de la planta.

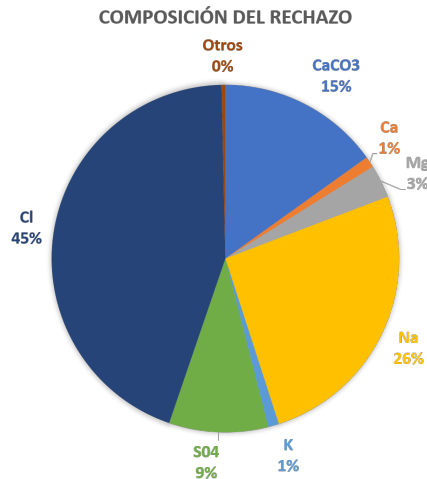


Figura 2.2: Composición del rechazo en porcentajes.

2.8.1. Línea de base del proyecto INCO

Para establecer la línea de base de los ecosistemas marinos que se verán afectados por el proyecto se definió un área de influencia en el interior de la Bahía Conchalí desde superficie a fondo, siguiendo la orilla del bajo por unos 30 metros aproximadamente [27]. Por otra parte, se espera que la concentración del rechazo sobrepase los niveles normales de salinidad de 34 a 36 psu en un radio de 7 metros, la cual será diluida por las corrientes marinas [27].

La línea de base para esta sección de la evaluación ambiental se dividió en los ámbitos físico, químico y biológico. En cuanto al aspecto químico de la columna de agua evaluada en algunos organismos, se encontraron metales que sobrepasan los límites establecidos para el consumo humano, estos fueron: el arsénico (As) en las biotas, cadmio (Cd) y cromo (Cr) en moluscos filtradores y cobre (Cu) en los crustáceos [28].

Respecto a la caracterización biológica hecha por la consultora Jaime Illanes y Asociados [28] se encontraron los siguientes organismos:

- Comunidades planctónicas: copépodos, Concholepas, decápodos y diaotemas.
- Intermaeral de fondo blando: la zona superior se caracterizó por la presencia de *Orchestoidea tuberculada* *Excireolana sp.* y la zona baja por *Emerita analoga*.
- Aves y mamíferos hidrobiológicos: pingüino de Humboldt, chungungo, lobo marino común y algunos ejemplares de ballena franca austral. Todas estas especies están incluidas en alguna categoría de conservación.
- Submareal de fondos blandos: crustáceos y poliquetos.
- Submareal de fondos duros: comunidades de macroalgas bentónicas, algas calcáreas e invertebrados filtradores.

Capítulo 3

Marco Metodológico

3.1. Metodología

A continuación, en la figura 3.1 se presenta un mapa conceptual de la metodología que se utilizará para llevar a cabo este trabajo de título y posteriormente se procede a detallar cada punto.

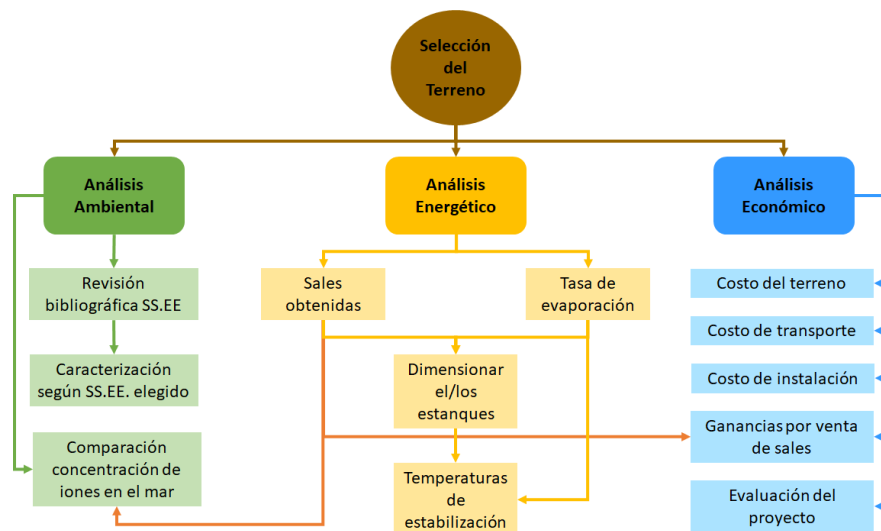


Figura 3.1: Mapa conceptual de la metodología.

Antes que todo, se decidirá la ubicación de los estanques de evaporación, se buscará que sea cercana a la planta desalinizadora en cuestión, para evitar mayores costos en el traslado del rechazo. A partir de sus coordenadas, se determinarán las propiedades de radiación; cantidad de milímetros de agua que caen al año; humedad relativa; y la velocidad y dirección del viento semanalmente. Esto último mediante datos de la página del Explorador Solar, la Dirección Meteorológica de Chile y/o por los datos de la estación de medición de MLP.

Luego de haber caracterizado el área de estudio se procederá con los respectivos análisis:

3.1.0.1. Análisis Energético

- Con las propiedades físicas del lugar se obtendrá la tasa de evaporación de la salmuera. Para esto se utilizará el método descrito en el paper “*Methods for calculating brine*

“evaporation rates during salt production” [29] el cual incluye la ecuación 3.1 donde: E es la tasa de evaporación expresada en $[mm/día]$; λ es el calor latente de evaporación en $[MJ/kg]$; Δ es el gradiente de presión de vapor en $[kPa/°C]$; γ es la constante psicométrica $[kPa/°C]$; R_n es la radiación solar $[MJ/m^2día]$; $f(u)$ es una función de la velocidad del viento en $[m/s]$; y e_s y e son la presión de vapor de saturación del agua y la presión de vapor ambiente del agua respectivamente, ambas expresadas en $[kPa]$.

$$\lambda \cdot E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) \cdot (e_s - e) \quad (3.1)$$

- Una vez calculada la tasa de evaporación y con los datos de volumen de salmuera que se descarga de la planta desalinizadora se cuantificarán el área y profundidad de los estanques. Para obtener el área se usará la fórmula 3.2 propuesta en el paper “Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants” [25] donde: $A_{abierta}$ es el área de superficie abierta de los estanques en $[m^2]$; $V_{rechazo}$ es el volumen del rechazo $[m^3/día]$; E es la tasa de evaporación $[m/día]$; y f_1 es un factor de seguridad para permitir tasas de evaporación inferiores a la media.

$$A_{abierta} = \frac{V_{rechazo} \cdot f_1}{E} \quad (3.2)$$

Luego, para determinar la profundidad mínima de las piscinas se usará la formula 3.3 donde: d_{min} es la profundidad mínima $[m]$, E_m es la tasa de evaporación media $[m/día]$ y f_2 es un factor de seguridad que incorpora los efectos de la duración del invierno [25].

$$d_{min} = E_m \cdot f_2 \quad (3.3)$$

- Se realizará un balance energético utilizando el procedimiento propuesto por Maria Luís Almeida e Sousa en su memoria “Solar evaporation System: Modeling and Controlling Brine Treatment Ponds” [30], donde la ecuación principal 3.4 considera la transferencia de calor por convección natural (q_{conv} $[W/m^2]$), conducción (q_{cond} $[W/m^2]$), radiación (q_{rad} $[W/m^2]$), evaporación (q_{eva} $[W/m^2]$) y calor absorbido de la radiación ($H_s \cdot F_s$ $[W/m^2]$). En este trabajo también se incluirá la entalpía de disolución de cada sal i (H_i $[kJ/mol]$); donde m_i $[mol/s]$ es la masa de la sal i formada, A $[m^2]$ es el área del estanque donde se forma la sal, C_{psal} $[kJ/kgK]$ es el calor específico de la salmuera, T_{sal} $[K]$ es la temperatura de la salmuera, $T_{salinicial}$ $[K]$ es la temperatura de la salmuera inicial, Δt es el paso del tiempo y d $[m]$ es la profundidad de los estanques. A partir de este balance se obtendrán las temperaturas que alcanza la salmuera en los estanques de evaporación.

$$d \cdot C_{psal} \cdot \frac{(T_{sal} - T_{salinicial})}{\Delta t} = F_s \cdot H_h - q_{conv} - q_{rad} - q_{eva} - q_{cond} + \frac{\Delta H_i \cdot m_i}{A} \quad (3.4)$$

- Para establecer las concentraciones de las sales se considerará el orden de precipitación según su solubilidad. En base a esto, se obtendrán la cantidad de moles de sal que se producen según los moles disponibles del ion original restando a su vez los moles ya utilizados en la precipitación de la sal más soluble.

3.1.0.2. Análisis Ambiental

- En primer lugar se mencionarán los servicios ecosistémicos que presta el sector intervenido. Para esto, se realizará una revisión bibliográfica de la “*Evaluación de los Ecosistemas del Milenio*”, la “*Clasificación Internacional Común de Servicios Ecosistémicos*” y “*La Economía de los Ecosistemas y Biodiversidad*”, luego se seleccionará una de estas clasificaciones y se caracterizará, en base a esta, el área que se verá modificada por la instalación de los estanques de evaporación.
- Se realizará una comparación de la composición del mar antes de la planta desalinizadora, con la planta descargando totalmente el rechazo al mar y con la planta descargando un porcentaje menor al mar, en caso de que los estanques no logren suplir la demanda total. Para esto se tiene la composición del agua que se extrae del mar, el rechazo que descarga la planta sin otro medio para tratar la salmuera y, dependiendo del resultado de la evaluación energética, se tendrá un porcentaje de salmuera que aún deba ser vertido en el océano, por lo que se obtendrá su composición y se compararan los tres casos.
- En conjunto con el punto anterior, se analizará el impacto que tiene el uso de los estanques de evaporación en el ecosistema marino. Es decir, se estudiará como afecta la reducción de salmuera que se provocaría por el uso de estas piscinas en el océano.

3.1.0.3. Análisis Económico

- Se investigará el costo de la tierra en la ubicación seleccionada. Para esto, se buscará un predio en la página del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) del ministerio de agricultura y a partir de esta información en la sección de mapas del Servicio de Impuestos Internos se obtendrá el valor fiscal del terreno. En caso de que el territorio escogido sea fiscal, se buscará información en Bienes Nacionales.
- Se estimará el costo de transporte del rechazo desde la planta hasta los estanques. Una vez definido el sitio en el que se instalarán los estanques se obtiene la distancia a la planta y el perfil de elevación del recorrido. Con esto, se diseñará a grandes rasgos el pipeline necesario para transportar la cantidad de salmuera estimada en el análisis energético. Los costos de transporte se traducirán entonces, en los costos del pipeline diseñado y sus respectivos componentes.
- Se estimarán costos de instalación de la planta. Se cotizarán los movimientos de tierra necesarios para la construcción de los estanques de evaporación y los revestimientos convenientes para no dañar el suelo y/o los acuíferos subterráneos que puedan existir.
- Se estimarán las ganancias por venta de sales. Se cotizará en el mercado los precios de las sales que se produzcan a partir de la evaporación de la salmuera y con la cantidad de sales obtenidas del análisis energético se obtendrá un valor aproximado.
- Se realizará un flujo de caja a 15 años el cual considerará exclusivamente la inversión inicial y la ganancia por venta de sales, a partir de este flujo de caja se obtendrá el VAN y la TIR del proyecto.

3.2. Memoria de Cálculo

3.2.1. Tasa de evaporación

En primer lugar, se busca obtener la tasa de evaporación mensual de la salmuera. Para esto, se considera que la salmuera está compuesta principalmente por NaCl y se procede según lo descrito en el primer paper citado en la sección 3.1 [29], cuya metodología se muestra a continuación:

La temperatura a utilizar, T en °C, es el promedio mensual y se describe mediante la fórmula 3.5.

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (3.5)$$

Luego, el calor latente de evaporación λ [MJ/kg], varía con la temperatura según la fórmula 3.6.

$$\lambda = 2.501 - 0.002341 \cdot T \quad (3.6)$$

Posteriormente se obtiene el coeficiente de concentración del agua a_w en función de la concentración del cloruro de sodio, m en [moles/l] en el rechazo.

$$a_w = 0.0011 \cdot m^2 - 0.0319 \cdot m + 1 \quad (3.7)$$

Una vez obtenido el coeficiente de agua se calcula la presión de vapor saturada, e_s [kPa], según la fórmula 3.8

$$e_s = 0.6108 \cdot a_w \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{237.3 + T}\right) \quad (3.8)$$

Con esto, el gradiente de la presión de saturación del vapor, Δ [kPa/°C], se calcula según 3.9

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(273.3 + T)^2} \quad (3.9)$$

La constante psicrométrica, γ [kPa/°C], se obtiene según la presión atmosférica P en la zona mediante la formula 3.10

$$\gamma = 0.000655 \cdot P \quad (3.10)$$

La presión de vapor, e [kPa], se determina en función de la humedad relativa, H_r [%], según la ecuación 3.11

$$e = \frac{H_r \cdot E_s}{100} \quad (3.11)$$

La función del viento, $f(u)$ [m/s], está dada por la fórmula 3.12, donde U [m/s] es la velocidad del viento.

$$f(u) = 6.43 \cdot (1 + 0.536 \cdot U) \quad (3.12)$$

Por último se obtiene la tasa de evaporación, E [mm/día], según la ecuación 3.13.

$$E = \frac{\Delta}{\lambda \cdot (\Delta + \gamma)} \cdot R_n + \frac{\gamma}{\lambda \cdot (\Delta + \gamma)} \cdot f(u) \cdot (e_s - e) \quad (3.13)$$

Donde las variables ya han sido descritas y R_n [MJ/m²día] es la radiación global.

Una vez calculada la tasa de evaporación se procede a establecer el área y profundidad de los estanques, según las ecuaciones 3.2 y 3.3, considerando un factor de seguridad $f_1 = 1.2$ y $f_2 = 30$. Este cálculo es un proceso iterativo el cual indicará cuánto volumen es el que se podrá tratar en los estanques considerando que un área máxima disponible según el territorio seleccionado.

3.2.2. Balance de energía

Para lograr el balance de energía descrito en la sección 3.1 y despejar la temperatura final de la salmuera, con la cual se podrá rectificar la tasa de producción de sales, se utiliza la configuración de transferencia de calor mostrada en la figura 3.2.

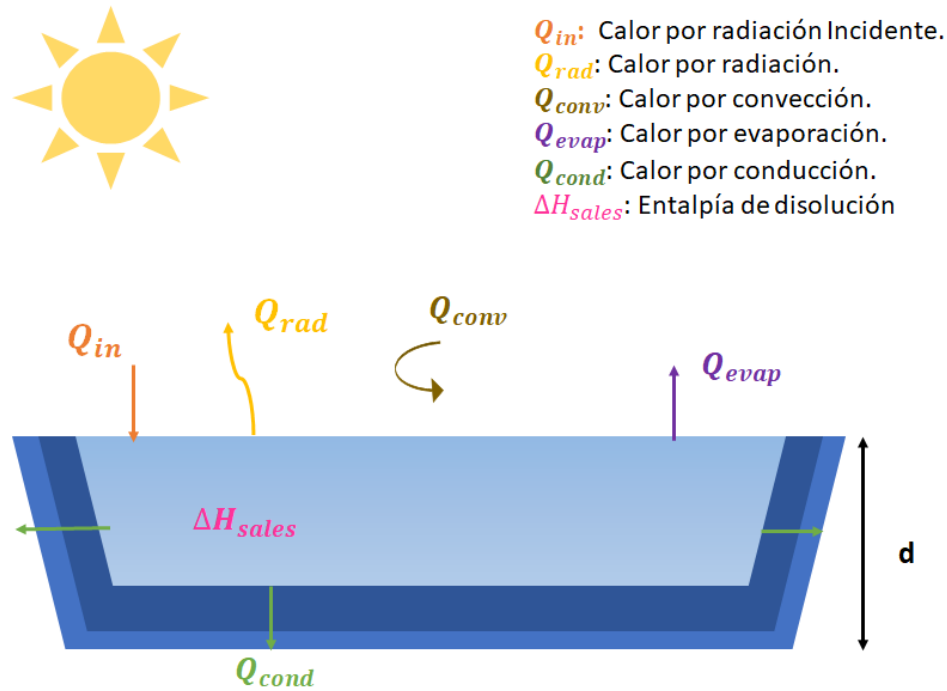


Figura 3.2: Esquema del balance de energía en el estanque de evaporación.

A continuación, se presentan las respectivas ecuaciones para cada método de transferencia de calor:

- Convección:

$$q_{conv} = h_c \cdot (T - T_{sal}) \quad (3.14)$$

Donde q_{conv} es el calor transferido por convección en $[W/m^2]$; h_c es el coeficiente de convección en $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ descrito en la ecuación 3.15, con U la velocidad del viento en $[m/s]$; T_{sal} la temperatura de la salmuera en $[^\circ C]$ y T es la temperatura ambiente en $[^\circ C]$.

$$h_c = 2.8 + 3 \cdot U \quad (3.15)$$

- Evaporación:

$$q_{ev} = \frac{\lambda \cdot E_m \cdot \rho \cdot 10^6}{86400} \quad (3.16)$$

Donde q_{ev} es el calor transferido por evaporación en $[W/m^2]$, λ es el calor latente de evaporación en $[MJ/kg]$, E_m es la tasa de evaporación en $[m/día]$ y ρ es la densidad de la solución en $[kg/m^3]$. Se multiplica por un factor de 10^6 para pasar a $[J]$ y se divide por 86.400 para pasar a segundos.

- Radiación:

$$q_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{cielo}^4 - T_{sal}^4) \quad (3.17)$$

Donde q_{rad} es el calor por radiación en $[W/m^2]$, ϵ es la emisividad del agua igual a 0.96, σ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es de $5.67 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$, T_{sal} la temperatura de la sal en $[K]$ y T_{cielo} la temperatura del cielo en $[K]$. Cabe destacar que en este caso el intercambio de calor es con el ambiente por lo que la temperatura cielo será equivalente a la temperatura ambiente.

- Conducción:

$$q_{cond} = \frac{k}{l} \cdot (T_{suelo} - T_{sal}) \quad (3.18)$$

Donde q_{cond} es el calor por conducción entre la solución (fluido) y el revestimiento en $[W/m^2]$, k es la conductividad térmica $[W/mK]$, l es el espesor del revestimiento en $[m]$, y T_{sal} y T_{suelo} las temperaturas de la salmuera y el suelo en $[K]$ respectivamente.

- Radiación incidente:

$$q_{in} = F_s \cdot R_h \quad (3.19)$$

Donde q_{in} es el calor absorbido por la radiación horizontal en $[W/m^2]$, F_s es la fracción solar absorbida que se calcula según la formula 3.20, con r el índice de reflexión, y R_h es la radiación global horizontal en $[W/m^2]$.

$$F_s = (1 - r) \quad (3.20)$$

- La entalpía de disolución de las sales se obtiene a partir de bibliografía [31] y se muestra en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: Entalpías de disolución de sales

Sal	Entalpía [kJ/mol]
CaCO3	-
CaSO4	-21.34
NaCl	4.87
KCl	18.43
MgCl2(6H2O)	-14.23
MgSO4(7H2O)	13.31

Los cálculos mostrados en los párrafos anteriores se realizaron en el software MATLAB y el código respectivo se puede observar en la sección B.1 del anexo.

3.2.3. Decantación de sales

Para determinar cuánto se produce de cada sal se realiza un proceso iterativo hasta la evaporación total de la salmuera. Las ecuaciones a utilizar son:

- Volumen de agua en el estanque considerando el volumen máximo como condición inicial ($i = 0$):

$$V_i = V_{i-1} - E_j \cdot A_k \cdot 1000 \cdot (d_i - d_{i-1}) \quad (3.21)$$

Donde V_i es el volumen del estanque [l] para el día i –ésimo y V_{i-1} el volumen para el día $i - 1$, E_j es la tasa de evaporación en el mes j –ésimo [m/día], A_k es el área del estanque k –ésimo [m^2], y d_i y d_{i-1} son los días i e $i - 1$.

- La masa de sal disuelta inicialmente es:

$$M_d(0) = V(0) \cdot C_p \quad (3.22)$$

Donde $M_d(0)$ es la masa de sal disuelta al día 0 [g], $V(0)$ es el volumen inicial [l] y C_p es la concentración inicial de la p -ésima sal [g/l].

- Luego, la masa de la sal disuelta es:

$$M_{di} = \min(V_i \cdot C_p, M_{di-1}) \quad (3.23)$$

- Finalmente, la masa de la sal decantada es:

$$M_{ci} = M_{di-1} - M_{di} \quad (3.24)$$

3.2.4. Dimensionamiento de pipeline

En primer lugar, se calcula el diámetro interno de la tubería D_i [m] mediante la ecuación 3.25

$$D_i = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{v \cdot \pi}} \quad (3.25)$$

Donde Q es el caudal [m^3/s] y v es la velocidad [m/s]. Cabe destacar que el rango de velocidades óptimo para el pipeline se obtiene del libro “*Flow of Fluids*” [32] (ver figura 3.3) y cumple con la norma chilena NCH1105 [33].

Reasonable Velocities
for the Flow of water through Pipe

Service Condition	Reasonable Velocity
Boiler Feed.24 to 4.6 metres per second
Pump Suction and Drain Lines.12 to 2.1 metres per second
General Service.12 to 3.0 metres per second
City	to 2.1 metres per second

Figura 3.3: Rango de velocidades para tuberías según CRANE [32].

Posteriormente, se determinan las pérdidas de carga. Para esto, se utilizan las ecuaciones de Hazen-Williams 3.26 y de Darcy-Weisbach 3.27, las cuales se muestran a continuación:

- Hazen-Williams:

$$H = 10.643 \cdot Q^{1.85} \cdot C^{-1.85} \cdot D_i^{-4.87} \cdot L \quad (3.26)$$

Donde H es la pérdida de carga total [$m.c.a.$], C es el coeficiente de Hazen-Williams, en este caso $C=150$, y L es el largo total de la tubería [m].

- Darcy-Weisbach:

$$H = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D_i \cdot 2 \cdot g} \quad (3.27)$$

Donde g es la gravedad [m/s^2] y f es el coeficiente de fricción, el cual se obtiene mediante la ecuación 3.28.

$$f = \left(\frac{1}{-2 \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.71 \cdot D_i} + \frac{5.62}{Re^{0.9}} \right)} \right)^2 \quad (3.28)$$

Con ϵ la rugosidad del material [34] y Re el número de Reynolds.

Luego, se considera la mayor de las pérdidas de carga y sumado a la diferencia de altura se determina la presión nominal de la tubería. Finalmente, con la tensión de diseño del material 3.29, la presión nominal y el diámetro interno se obtiene el espesor, y por ende diámetro externo de la tubería, siguiendo la ecuación 3.30

$$\sigma_s = \frac{MRS}{c} \quad (3.29)$$

Donde σ_s es la tensión de diseño [MPa], MRS es la resistencia mínima requerida del material [MPa] y c es el coeficiente de diseño.

$$e = \frac{PN \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_s + PN} \cdot \left(1 + \frac{PN}{2 \cdot \sigma_s + PN} \right)^{-1} \quad (3.30)$$

Donde e es el espesor [m] y PN es la presión nominal [MPa].

Una vez obtenidas las pérdidas de carga se procede a calcular los requerimientos para las bombas. Con este fin, en primer lugar se determina la altura estática H_e , en metros, con la fórmula 3.31:

$$H_e = H_f - H_i \quad (3.31)$$

Donde H_f y H_i son la altura final e inicial del tramo respectivamente.

A continuación, se calculan las pérdidas que se producen a lo largo de la tubería H_l en metros por columna de agua, para esto se utiliza la mayor pérdida de carga unitaria obtenida por las ecuaciones 3.26 y 3.27 y se multiplica por el largo del tramo, como se muestra en la ecuación 3.32

$$H_l = (L_f - L_i) \cdot H \quad (3.32)$$

La suma de la pérdida de carga por tramo con la altura estática da como resultado la altura dinámica (TDH), sin embargo, se considera un factor de seguridad hidráulico (s), por lo que la altura dinámica final se obtiene con la ecuación 3.33

$$TDH = (H_l + H_e) \cdot H \cdot s \quad (3.33)$$

Por último se busca la potencia mínima que requiere el sistema la cual se calcula según el siguiente procedimiento:

1. Potencia P en $[kW]$

$$P = \frac{TDH \cdot \rho \cdot g \cdot Q}{3600 \cdot 746 \cdot 1.341} \quad (3.34)$$

Donde Q es el caudal en $[m^3/h]$, g es la aceleración de gravedad y ρ es la densidad del fluido $[kg/m^3]$.

2. Potencia al eje de la bomba P_{eb} en $[kW]$

$$P_{eb} = \frac{P}{\eta_b} \quad (3.35)$$

Donde η_b es el rendimiento de la bomba.

3. Potencia al eje del motor P_{em} en $[kW]$

$$P_{em} = \frac{P_{eb}}{\eta_T} \quad (3.36)$$

Con η_T el rendimiento de transmisión.

4. Potencia al motor P_m en $[kW]$

$$P_m = \frac{P_{em}}{\eta_m} \quad (3.37)$$

Donde η_m es el rendimiento del motor

Capítulo 4

Resultados

En primer lugar se definió el sitio en el cual se ubicarán los estanques de evaporación, el área seleccionada se encuentra a 14.24 [km] de la planta desalinizadora y su posición es -31.8720° de latitud, -71.3535° de longitud a 224 [msnm]. Este sitio cuenta con aproximadamente 171 hectáreas ($1.71 [km^2]$) disponibles para la instalación de los estanques. En la figura 4.1 se observa con un pin verde la ubicación de la planta desalinizadora en la bahía Conchalí y en rojo se muestra el área seleccionada para la instalación de los estanques.

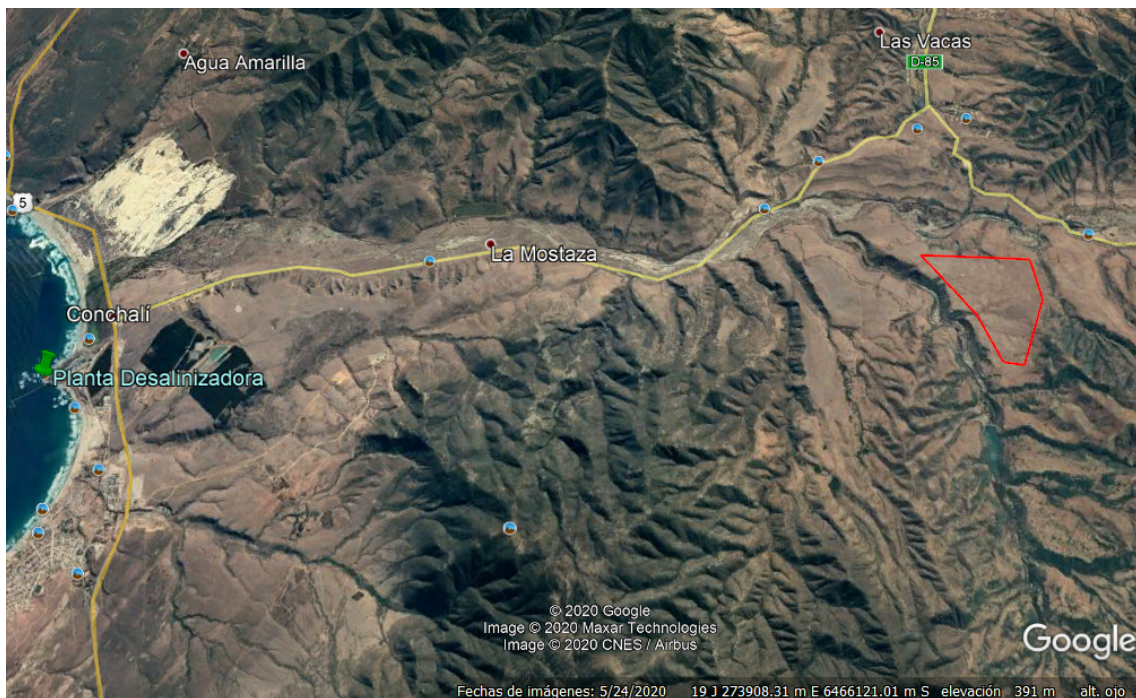


Figura 4.1: Ubicación de la planta desalinizadora y futuros estanques de evaporación (extraída de Google Earth el 13 de septiembre de 2020).

Los datos meteorológicos de la zona elegida se obtuvieron del Explorador Solar (sitio <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/exploracion>), por lo que son registros tomados durante los años 2004 y 2016. Por otro lado, el Explorador Solar no entrega datos de humedad relativa ni de milímetros de agua caída, por lo que se buscó la información en la estación meteorológica más cercana, ubicada en el Vivero Conaf en Illapel (código 310040) considerando registros a

partir de abril de 2019 hasta marzo de 2020. En la tabla 4.1 es posible observar el promedio mensual de la radiación global, radiación global horizontal, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y los milímetros de agua caída respectivamente.

Tabla 4.1: Resumen de datos meteorológicos del lugar

Mes	Rg [W/m ²]	Rgh [W/m ²]	T [°C]	V [m/s]	H %	Ag[mm]
Ene	304.60	339.42	17.15	2.96	64.1	0
Feb	299.79	304.15	17.58	2.90	67.2	0
Mar	286.97	254.15	17.01	2.37	71.3	0
Abr	241.91	185.26	15.38	1.56	74.3	0.04
May	190.41	129.69	13.74	1.16	72.5	0.05
Jun	172.28	109.62	13.38	1.26	72.3	0.35
Jul	178.38	118.18	11.66	1.37	71.8	0.03
Ago	203.37	150.56	11.64	1.41	59.6	0
Sep	234.19	200.08	11.96	1.91	65.4	0
Oct	265.92	259.48	13.28	2.11	56.7	0
Nov	285.80	308.58	14.73	2.85	56.8	0
Dic	299.73	341.40	15.74	3.25	59.4	0

4.1. Análisis Energético

4.1.1. Caracterización de las sales

Para caracterizar las sales con mayor probabilidad de precipitación a partir del proceso de evaporación, se tuvieron en consideración tres factores: 1. las sales que por bibliografía se sabe que se forman normalmente (ver sección 2.7), 2. los iones mayoritarios que componen el rechazo (ver figura A.3) y 3. la solubilidad de cada sal. Respecto a estos dos últimos puntos en la tabla 4.2 se puede observar en detalle la concentración de cada sal, el flujo, y su solubilidad, teniendo en cuenta que todos los datos fueron obtenidos a una temperatura de 20[°C].

Entonces, de la bibliografía y composición del rechazo se obtuvo que las sales que se producirían serían: Carbonato de calcio ($CaCO_3$), Sulfato de calcio ($CaSO_4$), Cloruro de sodio ($NaCl$), cloruro de potasio (KCl), cloruro de magnesio hexahidratado ($MgCl \cdot 6H_2O$) y Sulfato de magnesio heptahidratado ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$).

Cabe destacar que la determinación del área del o los estanques depende de las sales que se produzcan y estas a su vez dependen de la tasa de evaporación, es un proceso iterativo por lo que la selección final de las sales que se producirán se determinará en la subsección siguiente.

Tabla 4.2: Características de las sales

Sal	Densidad [g/l]	Solubilidad [g/l]	Concentración Inicial [mol/l]	Flujo [mol/s]
CaCO ₃	2710	1	0.133	8.82
CaSO ₄	2320	2	0.022	1.48
NaCl	2160	360	0.987	65.59
KCl	1500	350	0.023	1.50
MgCl ₂ (6H ₂ O)	1570	1670	0.045	3.02
MgSO ₄ (7H ₂ O)	1680	740	0.062	4.12

4.1.2. Dimensionamiento de los estanques

Los resultados para los cálculos de tasa de evaporación y área de los estanques de evaporación se pueden observar en la tabla 4.3, donde “ E ” es la tasa de evaporación en [mm/día], la cual solo depende de las condiciones ambientales descritas anteriormente; “ $A1$ ” es el área total a ocupar considerando el volumen diario original de salmuera, es decir, 40176 [m³]; y “ $A2$ ” es la superficie total tomando en cuenta un volumen diario de 5739.4 [m³]; este último volumen se determinó para no sobrepasar el área total máxima del terreno. Por otro lado, la profundidad mínima estimada es de 2.6 [cm], ahora bien, tomando las consideraciones del paper citado para este cálculo en la sección 3.1, se utilizará una profundidad total de 20 [cm], teniendo en cuenta que 5 [cm] serán utilizados por los revestimientos.

Tabla 4.3: Tasa de evaporación y área total necesaria del estanque por mes.

Mes	E [mm/día]	$A1$ [km ²]	$A2$ [km ²]
Ene	8.03	6.01	0.86
Feb	7.77	6.20	0.89
Mar	7.20	6.70	0.96
Abr	5.95	8.10	0.16
May	4.81	10.01	1.43
Jun	4.45	10.82	1.55
Jul	4.63	10.41	1.49
Ago	5.52	8.74	1.25
Sep	6.17	7.81	1.12
Oct	7.20	6.69	0.96
Nov	7.90	6.10	0.87
Dic	8.23	5.86	0.84

Una vez que se obtuvo la tasa de evaporación se procede a calcular el tiempo en el que comienza la decantación de cada sal, para esto se considera que el fluido ingresa al primer estanque y comienza a circular lentamente mientras se evapora el agua hasta llegar al último estanque. El día en el que comienza a decantar cada sal depende de la concentración de cada una de estas y de su solubilidad; además se considera para su cálculo una diferencia de 0.2

[días]. En la tabla 4.4 columna “ET” se observa en cuanto tiempo se evaporaría toda el agua según el mes, en promedio desde que la salmuera ingresa al primer estanque y fluye por las piscinas hasta que se evapora por completo pasan aproximadamente 30 días, siendo los meses de junio y julio los que más tiempo tardaría en terminar el proceso.

Luego, según se puede ver en la tabla 4.4, las sales carbonatadas comienzan a decantar en el mismo día en el que ingresa el rechazo al estanque, posteriormente decanta el cloruro de sodio y finalmente el resto de las sales. Se puede observar también que hay meses en los que el cloruro de potasio y la bischufita no alcanzan a precipitar, sumado a lo anterior y del estudio de la tabla 4.2 es posible notar que estas sales, en particular el cloruro de potasio y también el sulfato de calcio, tienen un flujo bastante menor a las demás sales. Dicho esto, la decantación de estas tres sales se considera irrelevante para este estudio. Luego, las sales que si se estudian son: carbonato de calcio, cloruro de sodio y sulfato de magnesio heptahidratado.

Tabla 4.4: Tiempo en el que comienzan a decantar las sales

Mes	ET [días]	CaCO ₃ [días]	CaSO ₄ [días]	NaCl [días]	KCl [días]	MgCl ₂ (6H ₂ O) [días]	MgSO ₄ (7H ₂ O) [días]
Ene	18.4	1.2	1.2	15.8	-	-	18.2
Feb	18.8	1.2	1.2	16.2	-	-	18.6
Mar	20.4	1.2	1.2	17.6	-	-	20.2
Abr	25.6	1.2	1.2	21.8	25.6	25.6	25.2
May	32.6	1.2	1.2	27.8	32.6	32.6	32.2
Jun	35.4	1.2	1.2	30.2	-	35.4	35
Jul	35.8	1.2	1.2	30.4	35.8	35.8	35.2
Ago	30.2	1.2	1.2	25.6	30.2	30.2	29.8
Sep	26.8	1.2	1.2	23	-	-	26.6
Oct	22.8	1.2	1.2	19	22.4	22.4	22
Nov	19.8	1.2	1.2	17	19.8	19.8	19.6
Dic	18.6	1.2	1.2	16	18.6	18.6	18.4

Ahora que se han seleccionado las sales que se estudiarán y se tienen los tiempos en los que comienzan a decantar, se puede estudiar el tiempo de residencia necesario para que cada sal precipite, estos tiempos se pueden ver en la tabla 4.5. Luego, se establece una razón entre los tiempos de decantación la cual es:

- Razón entre sal 1 y 2 ($CaCO_3$ y $NaCl$) igual a 1:6.
- Razón entre sal 2 y 3 ($NaCl$ y $MgSO_4(7H_2O)$) igual a 1:5.
- Razón entre sal 1 y 3 ($CaCO_3$ y $MgSO_4(7H_2O)$) igual a 1:30.

Cabe mencionar que para el cálculo de las razones entre las sales se consideró un tiempo de residencia del sulfato de magnesio desde el día en que comienza su decantación hasta el día en el que se evapora toda el agua.

Sabiendo que se tendrán tres sales principales, que decantan en distintos tiempos y conociendo los tiempos de residencia de cada una de estas sales, se dividió el área total en

Tabla 4.5: Tiempos de residencia para cada sal.

Mes	CaCO ₃	NaCl	MgSO ₄ (7H ₂ O)
Ene	14.4	2.2	0.2
Feb	14.8	2.2	0.2
Mar	16.2	2.4	0.4
Abr	20.4	3.2	0.4
May	26.4	4.2	0.4
Jun	28.8	4.6	0.6
Jul	29.0	4.6	0.6
Ago	24.2	4.0	0.4
Sep	21.4	3.6	0.2
Oct	17.8	2.8	0.2
Nov	15.6	2.4	0.2
Dic	14.6	2.2	0.2

tres grandes estanque cuyas áreas son: 1,333,300 [m^2], 222,200 [m^2] y 44,500 [m^2] respectivamente, la suma de estas áreas es de 1.6 [km^2] dado que se decidió dejar 1 [km^2] para tener espacio para mover maquinaria y/o transitar. Luego, el área del primer estanque se dividió en tres para evitar el estancamiento total del agua, entonces, las respectivas áreas de los cinco estanques se pueden ver en la tabla 4.6, donde las áreas 1, 2 y 3 corresponden al primer gran estanque.

Tabla 4.6: Área de cada estanque

Estanque	A [km^2]
1	0.67
2	0.44
3	0.22
4	0.22
5	0.04
Atotal	1.6

En la figura 4.2 se puede apreciar la división de la superficie en los cinco estanques, donde el flujo de salmuera ingresa al estanque 1 (en color celeste) y va avanzando a las siguientes piscinas en las cuales van decantando las diferentes sales. Los estanques **1** (color celeste), **2** (color verde) y **3** (color azul) se denominan concentradores, esto debido a que se encargan de evaporar el agua y decantar $CaCO_3$; el estanque **4** (color naranja) es donde se obtiene $NaCl$; y en el estanque **5** (color café) principalmente precipita $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.

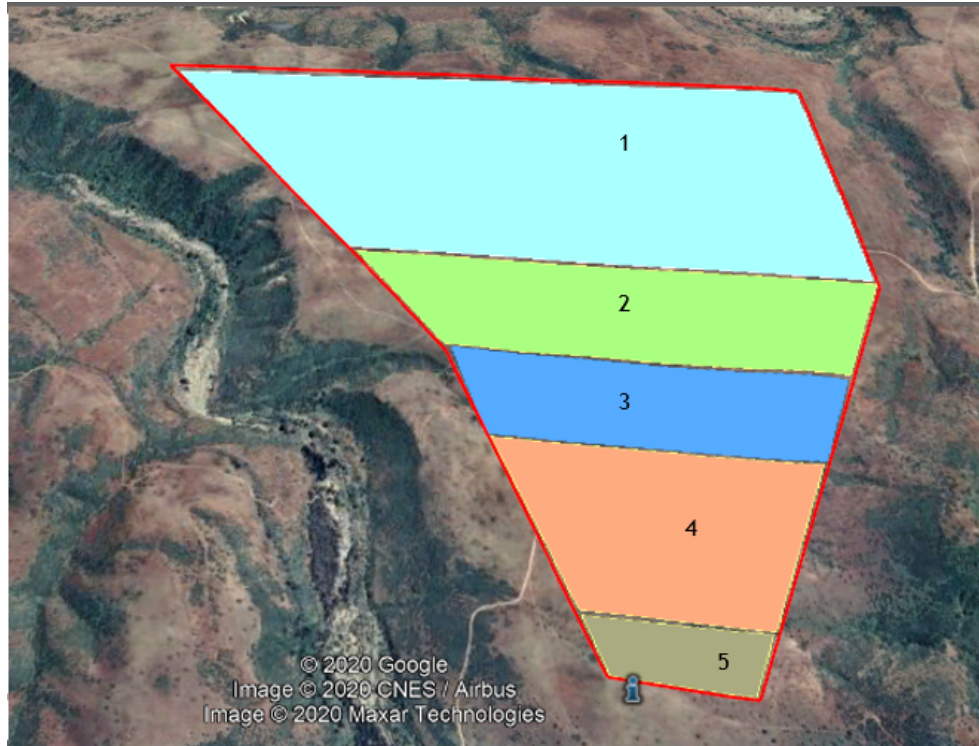


Figura 4.2: División del área en los distintos estanques de evaporación, imagen extraída de GoogleEarth.

Ahora que se tienen las áreas de cada estanque y los tiempos de residencia es posible saber cuanta sal se generaría al mes. En la tabla 4.7 se observa la sal en toneladas que se generaría en cada estanque al mes, siendo “ $S1$ ” el estanque para $CaCO_3$, “ $S2$ ” el estanque donde se produce $NaCl$ y “ $S3$ ” el estanque para el resto de las sales, principalmente $MgSO_4$. De la tabla 4.7 se puede ver también que en los meses de junio y julio no se producen sales, esto se debe a que se destinarán dichos meses para el mantenimiento de las piscinas y equipos.

4.1.3. Balance de energía

Para establecer el balance de energía que ocurre en los estanques se considera la configuración mostrada en la figura 3.2 y a partir de la ecuación 3.4 se obtienen las temperaturas máximas que alcanza la salmuera, en grados Celsius, en los estanques de evaporación cuando el intercambio de calor se hace cero. Estas últimas se pueden estudiar en la tabla 4.8, donde las columnas S_i indican el estanque en el que se realizó el análisis. Además, se calculó el tiempo aproximado que la salmuera tarda en llegar hasta el punto de equilibrio variando este entre 2500 [s] y 3000 [s].

Cabe destacar que en la ecuación 3.4 se presenta la transferencia de calor por distintos medios, dentro de estos está la transferencia de calor por conducción a través de los revestimientos Q_{cond} , la cual considera el coeficiente de conductividad térmica del HDPE igual a $0.4 [W/mK]$ [35] y un espesor de revestimientos de $5 [cm]$; el calor que se libera por la evaporación del agua Q_{evap} , la transferencia de calor por convección que se produce fuera del estanque Q_{conv} ; el calor que se libera por radiación Q_{rad} ; y la radiación global (en el plano horizontal) que absorbe la salmuera H_h .

Tabla 4.7: Cantidad de sal producida por estanque al mes

Mes	S1 [Ton]	S2 [Ton]	S3 [Ton]
EEne	2,502	1,561	65
Feb	2,502	1,570	67
Mar	2,504	1,553	101
Abr	2,505	1,619	97
May	2,510	1,649	83
Jun	-	-	-
Jul	-	-	-
Ago	2,506	1,650	91
Sep	2,505	1,670	74
Oct	2,504	1,668	89
Nov	2,503	1,628	85
Dic	2,502	1,605	83
Total [ton]	25,043	16,173	835

Tabla 4.8: Temperaturas de estabilización de la salmuera

Mes	S1 [°C]	S2 [°C]	S3 [°C]	S4 [°C]	S5 [°C]
Ene	23	23	23	23	23
Feb	22	22	22	22	22
Mar	20	20	20	20	20
Abr	16	16	16	16	16
May	13	13	13	13	13
Jun	12	12	12	12	12
Jul	10	10	10	10	10
Ago	11	11	11	11	11
Sep	14	14	14	14	14
Oct	17	17	17	17	17
Nov	20	20	20	20	20
Dic	22	22	22	22	22

4.2. Análisis Ambiental

4.2.1. Servicios Ecosistémicos

Para clasificar y describir un ecosistema y los servicios que éste presta a la sociedad existen diferentes clasificaciones. A continuación, se presentarán las tres más relevantes y posteriormente se seleccionará una para analizar la zona previamente seleccionada para la instalación de los estanques de evaporación.

4.2.1.1. Evaluación del los Ecosistemas del Milenio

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (desde ahora también llamada MA) se llevó a cabo durante los años 2001 y 2005 con el fin de evaluar las consecuencias del cambio de los ecosistemas en el bienestar humano y establecer una base científica para las acciones que se deben realizar con el objetivo de mejorar la conservación y uso sostenible del medio ambiente.

Como se menciona en la sección 2.1, para la MA un ecosistema es *“un complejo dinámico de comunidades de plantas, animales y microorganismos, y el entorno no vivo interactuando como una unidad funcional”* [36]. Por otro lado, los servicios ecosistémicos son *los beneficios que puede obtener la población a partir de estos ecosistemas*, es decir, como ellos impactan al bienestar humano. Además, la MA asume que el bienestar de la población incluye diversos componentes, entre estos están el material básico para una buena vida, refugio, salud, un entorno limpio, buenas relaciones sociales, seguridad personal, protección ante desastres naturales y provocados por el hombre, libertad de acción y de elección, entre otros.

La Ma clasifica los servicios ecosistémicos en 4 grandes grupos:

- **Servicios de aprovisionamiento:** tales como comida, agua, fibras, madera, etc.
- **Servicios de regulación:** afectan al clima, inundaciones, desechos, calidad de agua y enfermedades.
- **Servicios culturales:** que proveen beneficios espirituales, recreacionales y estéticos.
- **Servicios de soporte:** como formación de suelo, fotosíntesis y ciclos de nutrientes.

En la figura 4.3 se observa la clasificación de los servicios ecosistémicos y su relación con el bienestar de la población según la MA de 2005.

Es importante mencionar que a partir de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio se obtuvo como resultado que un 60 % de los ecosistemas examinados se encuentran degradados o son explotados de forma no sustentable. La evidencia indica que los cambios en el medio ambiente no son lineales y son potencialmente irreversibles provocando importantes consecuencias en el bienestar del ser humano. Por otra parte, los efectos de la sobreexplotación de los ecosistemas han contribuido a aumentar la inequidad entre poblaciones causando pobreza y conflictos sociales [36].



Figura 4.3: Relación entre servicios ecosistémicos y el bienestar humano [36].

4.2.1.2. Clasificación Internacional Común de Servicios Ecosistémicos

La Clasificación Internacional Común de Servicios Ecosistémicos (CICES) se desarrolló a partir del trabajo en contabilidad ambiental realizado por la Agencia Europea de Medio Ambiente. Según CICES los servicios ecosistémicos se definen como “la contribución que hacen los ecosistemas al ser humano, y son distintos de los bienes y beneficios que las personas obtienen posteriormente de ellos” [37] y se clasifican a partir de sus contribuciones finales las cuales afectan directamente a las personas. Para esto, se usa el modelo de la cascada propuesto por Potschin y Haines-Young [37] mostrado en la figura 4.4. En este modelo la idea de “función” se usa para resaltar características del ecosistema que lo hacen ser un servicio. Por otro lado, los servicios finales son los que relacionan las funciones y procesos que los ecosistemas generan. Además, los conceptos de bienes y beneficios son aquellos que en última instancia tienen valor para las personas, pueden ser productos tangibles o no [37].

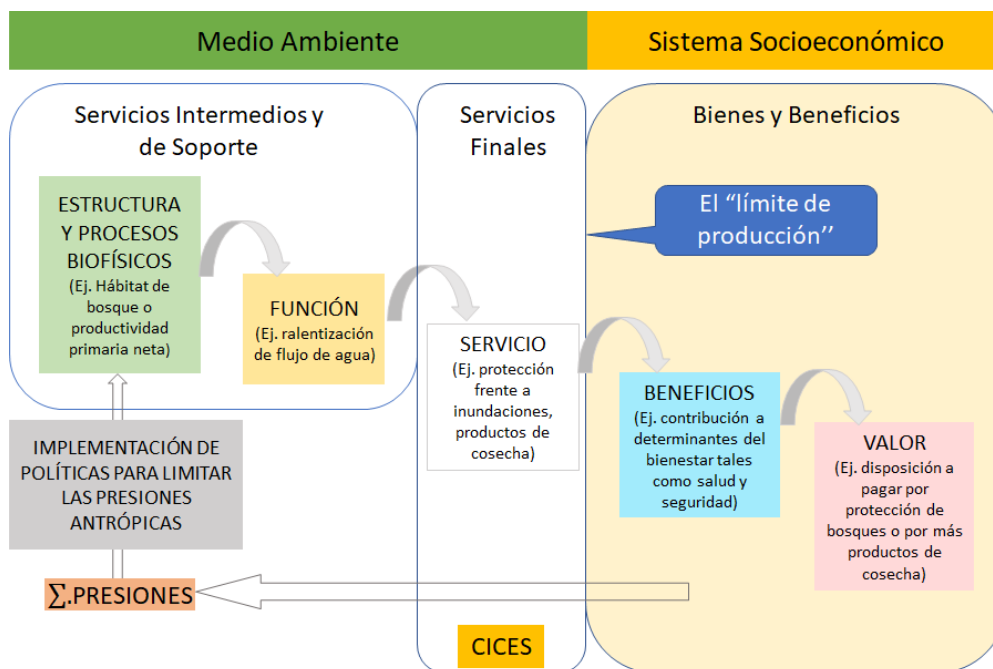


Figura 4.4: Modelo de la cascada de Potschin y Haines-Young [37].

Luego, los servicios ecosistémicos finales se dividen en tres categorías según CICES [37], estas son:

- **Aprovisionamiento:** incluye la provisión de alimentos, agua, materiales para construcción, fibras para vestimenta, combustibles y energía.
- **Regulación y mantenimiento:** la forma en la que viven los organismos puede moderar o modificar el ambiente por lo que afecta el bienestar humano, su seguridad y comfort. Se relaciona con la regulación del clima, enfermedades, inundaciones, purificación del agua, entre otras.
- **Cultural:** todo lo que no se consume, ya sea biótico o abiótico, y que aporta en la educación, recreación y salud espiritual de las personas.

4.2.1.3. La Economía de Ecosistemas y Biodiversidad: Fundamentos Ecológicos y Económicos

La Economía de Ecosistemas y Biodiversidad: Fundamentos Ecológicos y Económicos, desde ahora también llamada TEEB por sus siglas en inglés, es una iniciativa global cuyo principal objetivo es *“hacer visible los valores de la naturaleza incorporando la diversidad biológica y los servicios de los ecosistemas en la toma de decisiones a todos los niveles”* [38]. TEEB plantea que un ecosistema es *“un concepto que describe las interrelaciones entre organismos vivos y el entorno no vivo, y provee un enfoque holístico para la comprensión de la generación de servicios a partir de un entorno que ofrece beneficios e impone costos a las personas.”* [39], y clasifica los servicios ecosistémicos de la siguiente manera:

- **Aprovisionamiento:** esto implica comida, agua, combustibles y fibras, recursos genéticos (para disminuir la susceptibilidad a pestes y cambios en el clima), médicos, bioquímicos y ornamentales.

- **Regulación:** incluye la regulación de la calidad del aire, la calidad ambiental urbana, regulación del clima, moderación de eventos extremos, prevención de la erosión, mantención de la calidad del suelo, servicios de polinización, y control biológico,
- **Hábitat:** se refiere a la mantención de los ciclos migratorios de las especies y de la diversidad genética.
- **Culturales:** servicios de información estética, oportunidades de recreación y turismo, inspiración para la cultura, arte y diseño, experiencia espiritual e información para el desarrollo cognitivo.

4.2.1.4. Caracterización del área a intervenir

La zona en cuestión es una terraza fluvial, se encuentra rodeado por el estero Pupío, la quebrada La Palma y la quebrada Concón. Cabe destacar que 2.25 [km] al este se encuentra el Embalse Las Vacas de la Compañía Minera Don Alberto cuya función es depositar relaves [40]; y al norte, pasando la ruta D865, se encuentra un pequeño poblado denominado Cavilolen.

A partir de imágenes satelitales de Google Earth y la evaluación ambiental del Proyecto INCO [41] se procede a describir la flora y fauna del lugar, considerando ambientes distintos en las quebradas y en la pradera donde se colocarán los estanques, siendo este último el de mayor relevancia debido a que es precisamente en él donde se colocarán las piscinas:

- **Quebradas:** Presencia de matorral y bosque esclerófilo con representantes tales como espinos y tevos. Respecto a la fauna se pueden encontrar algunos anfibios como Sapito de cuatro ojos y Sapo arunco, esta última en categoría de Vulnerable; 13 especies de reptiles, todas con alguna categoría de conservación; 58 especies de aves, de ellas 2 son introducidas, 6 endémicas y el resto nativas, algunas de ellas en categoría Vulnerable; y 12 especies de mamíferos, con 5 de ellas en algún estado de conservación [41].
- **Pradera:** En este ambiente predomina la flora herbácea alcanzando 36 unidades distintas, las más abundantes son Brassica rapa y Herodium cicutarium. En cuanto a la fauna existe presencia anfibios, en particular el Sapito de cuatro ojos en categoría de Casi amenazado; 9 especies de reptiles, entre ellos la Lagartija parda, Lagartija de Zapallar, Culebra de cola larga, y Culebra de cola corta, todos estos especímenes en categoría Vulnerable; 64 especies de aves, de las cuales 7 son endémicas, 1 es introducida y el resto son nativas. Respecto a los mamíferos, se podrían encontrar 5 especies de las cuales dos son endémicas, una es introducida y el resto son nativas, en particular se pueden encontrar cururos cuyo estado de conservación es En Peligro [41].

Notar que la mayoría de las especies se repite en ambos ambientes.

Para caracterizar la zona que se verá afectada por la instalación de los estanques de evaporación mostrada en la figura 4.1 se utilizará la clasificación propuesta por TEEB debido a que en este trabajo se busca evaluar el proyecto de instalación de estanques de evaporación desde un punto de vista energético, ambiental y económico; además su documentación es más clara, completa y actual, respecto a la MA y CICES.

Luego, los servicios ecosistémicos que presta el lugar, y que se verían afectados por la instalación de los estanques de evaporación, se pueden observar en la figura 4.5.

Aprovisionamiento	
Agua	Debido a los esteros aledaños, hay agua que podría verse afectada por la instalación y operación de los estanques
Recursos Genéticos	Existe la posibilidad de que haya flora y fauna en algún estado de conservación. Además, se pueden encontrar especies endémicas de la zona, cuyo valor en la biodiversidad se debe preservar.
Regulación	
Mantenimiento de la calidad del suelo	Las hierbas y pequeños animales que habitan el área cumplen un rol de mantenimiento del suelo y sus procesos biológicos.
Polinización	Dado que existen diversas hierbas y flores, la zona presta un servicio de polinización.
Hábitat	
Mantenimiento de ciclos de vida de especies migratorias	Dada la cantidad de aves posibles de encontrar en el ambiente pradera y la variabilidad de especies en campañas de invierno y verano, es posible suponer que es una zona de ciclos migratorios.
Cultural y Amenidad	
	Esta zona podría servir como inspiración, recreación y educación para la población aledaña.

Figura 4.5: Servicios ecosistémicos provistos por el área seleccionada según datos de la evaluación ambiental del proyecto INCO [41]; [42].

4.2.2. Comparación de la concentración del agua de mar

Dado que se tiene la concentración de iones del mar, del rechazo (figura A.3) y el volumen de salmuera a tratar con los estanques de evaporación se proceden a comparar.

A continuación, en la tabla 4.9 se muestran las concentraciones de los iones en el agua de mar previo a la instalación de la planta desalinizadora (columna: “*Mar*”), las concentraciones del rechazo (columna “*Planta*”) y las concentraciones del rechazo considerando que un 14 % se iría a los estanques de evaporación (columna “*Estanques*”).

Tabla 4.9: Comparación de la concentración de las sales en el mar.

Ion	Mar [mg/l]	Planta [mg/l]	Estanques [mg/l]
CaCO ₃	6,653	13,287	11,427
Ca	448	895	770
Mg	1,350	2,696	2,319
Na	11,400	22,690	19,513
K	444	883	759
SO ₄	4,058	8,104	6,969
Cl	19,600	39,023	33,560
TDS	37,454	74,595	64,151

4.3. Análisis Económico

Previa a las cotizaciones es necesario determinar las características del pipeline que unirá la planta desalinizadora ubicada en Los Vilos con los estanques de evaporación. Siguiendo el procedimiento planteado en la sección 3.2, se obtuvo que la tubería a utilizar será de HDPE, con un diámetro de 206[mm] (8”), espesor de aproximadamente 21 [mm], y presión nominal de 16 [bar].

Por otro lado, de los cálculos de pérdida de carga se obtuvo que la máxima pérdida de carga por metro es de 2.16 [MPa] según la ecuación de Hazen-Williams. Luego, sumándole la pérdida de carga estática, y para no sobrepasar los 16 [bar] de presión nominal, se determinó que la máxima altura dinámica total es de 145 [m]. Debido a lo anterior es que se decide colocar tres (3) estaciones de bombeo, una cada 5 [km], ubicándose la primera en la planta desalinizadora (ver figura 4.6 o figura C.1 del anexo para verla en mayor tamaño). En cada estación de bombeo se colocarán dos bombas, una en constante funcionamiento y otra en stand-by para cuando sea necesario hacer mantención u ocurra alguna falla.

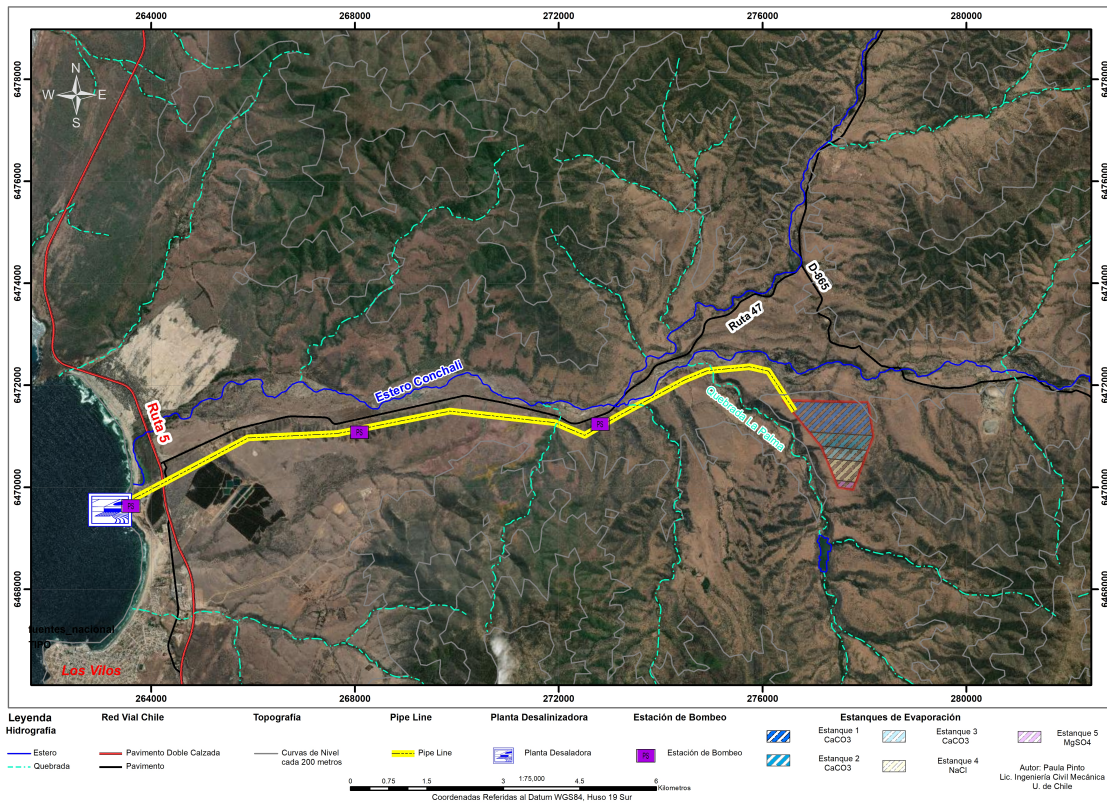


Figura 4.6: Pipeline desde la planta desalinizadora hasta los estanques.

Por otro lado, se establece que en cada estación de bombeo se colocarán dos válvulas mariposa, una antes y otra después de cada bomba, para cuando se requiera hacer mantenciones, también se dispondrá de una válvula antirretorno luego de cada bomba con el fin de evitar daños en la bomba, y se tendrán dos válvulas de alivio en la misma configuración que las válvulas mariposas para disminuir los peligros de que salga agua a alta presión cuando se hagan las mantenciones.

Una vez determinadas estas características se procede a cotizar los elementos respectivos.

4.3.1. Costos

Para conocer el valor del terreno, en primer lugar, se indagó el Rol del predio, una vez obtenido este, en la página del Servicio de Impuestos Internos se buscó el avalúo fiscal, el cual se puede observar en la figura C.2 del anexo, siendo el valor total de 339,999,743 [CLP].

Para conocer el precio de las tuberías se consultó el catálogo de precios de la marca Vinilit, para una tubería de PE100, de 12 [m] de largo, 200 [mm] (8") de diámetro, 18.2 [mm] de espesor y una presión nominal de 16 [bar], cuyo valor es de 55,560 [CLP/m] [43]. En la figura C.3 del anexo se puede ver la tubería seleccionada. Es posible notar que las dimensiones de esta tubería no son exactamente las mismas que las que resultan por cálculo, pero son las dimensiones comerciales más cercanas y de igual forma cumplen con los requerimientos solicitados y con el rango de velocidad de flujo establecido por normativa.

Para las bombas se cotizaron dos modelos en Wellford y un modelo en Masdaf, las cotizaciones se pueden observar en las figuras C.4 y C.5 del anexo. Finalmente se seleccionó la bomba Wiso E de la marca Wellford por su menor costo. Su precio es de 15,366,750 [CLP] con motor incluido.

Las válvulas mariposa y antirretorno se cotizaron en la página web de la empresa Fitvalv (<https://fitvalv.cl/>), en la figura C.6 del anexo se puede ver el carro de compra, y la válvula de alivio de presión se cotizó en la página de la empresa Megacenter (<https://www.megacenter.cl/>), en la figura C.7 del anexo se puede ver el carro de compras. Los precios unitarios para cada válvula son:

- Válvula mariposa tipo Wafer, modelo 2109-GE, 8" de diámetro: 129,893 [CLP], sin iva.
- Válvula antirretorno Duocheck, modelo 2401-GE, 8" de diámetro: 122,905 [CLP], sin iva.
- Válvula eléctrica reductora de presión, diámetro de 8": 2,069,662 [CLP], sin iva.

Todas las válvulas tienen una presión nominal de 16 [bar] y son de materiales resistentes a la corrosión, siendo las de la marca Fitvalv de acero inoxidable y la válvula de alivio de hierro fundido recubierto con Rilsan.

Para la construcción de las piscinas se tomó como valor referencial el servicio de excavación masiva de la empresa CMGC (ver sitio <http://www.cmgc.cl/excavaciones-masivas.html>) el cual tiene un valor de 4,900 [CLP/ m^3] para excavaciones de más de 5,000 [m^3].

El revestimiento de los estanques se compone de dos tipos de membranas diferentes, estas son geomembranas de HDPE y geotextiles, el precio de estas membranas se obtuvo de la empresa Geosintéticos SPA por medio de una cotización vía email la cual se puede observar en la figura C.8 del anexo. El valor de estas membranas es de:

- Geomembrana HDPE: 2,100 [CLP/ m^2] considerando una membrana de 1.5 [mm] de espesor.
- Geotextil: 980 [CLP/ m^2] para un geotextil de 300 [gr/ m^2].

En la tabla 4.10 es posible observar un resumen del costo de inversión inicial del proyecto.

Tabla 4.10: Resumen de cotizaciones.

Elemento	Marca	Precio Unit [CLP]	Precio Total [CLP]
Valor Terreno	Avalúo Fiscal	-	\$ 339,999,743
Tuberías HDPE	Vinilit	\$ 55,160	\$ 82,740,277.50
Excavación masiva	CMGC	\$ 4,900	\$ 1,865,920,000
Revestimientos	Geosintéticos SPA	\$ 3,080	\$ 1,868,776,000
Bombas	Wellford	\$ 15,366,750	\$ 109,718,595
Válvulas	Fitvalv	\$ 252,798	\$ 2,732,414
Válvulas	Megacenter	\$ 2,069,662	\$ 29,554,773
TOTAL			\$ 4,299,441,803

4.3.2. Beneficios

Para conocer un poco sobre el mercado de la sal se conversó vía videollamada con Gabriel Ramirez, Gerente General de la empresa Kul (<https://kulsalt.com/>), quien sugirió que para este proyecto, donde no se piensa lavar y tratar las sales en mayor profundidad, lo mejor sería vender el cloruro de sodio a empresas mineras para sus procesos de lixiviación y mantenimiento de caminos. Gabriel mencionó que el valor de la sal dependía en gran medida de los costos de transporte asociados, pero entregó como precio de referencia para la venta de NaCl a empresas mineras un valor de 59 [CLP/kg].

Por otra parte, se cotizó el precio de la caliza ($CaCO_3$) en aceros CAP, el precio referencial entregado es de 18.6 [CLP/kg] aproximadamente. La cotización se realizó vía mail, el cual se puede observar en la figura C.9 del anexo.

Para el sulfato de magnesio heptahidratado no se encontró un precio referencial y al estar esta sal mezclada, en realidad, con cloruro de magnesio hexahidratado y cloruro de potasio, se espera que su venta sea más compleja por lo que no se considerará en los beneficios económicos ni en el posterior análisis de flujo de caja.

Luego, los beneficios por venta de sales se obtienen de la multiplicación de la cantidad de sal que se genera (ver tabla 4.7) y el precio de las sales cotizado. A continuación, en la tabla 4.11 se pueden observar las ganancias que se obtendrían.

Tabla 4.11: Beneficios económicos por venta de sales

Sal	Precio unitario [CLP/kg]	Precio Anual x Estanque [CLP]	Marca
CaCO3	18.6	465,745,399	CAP
NaCl	59.0	954,197,432	Kul
MgSO4(7H2O)		-	
TOTAL		1,419,942,831	

4.3.3. Evaluación costos-beneficios

Para realizar la evaluación del proyecto se realizó un flujo de caja en el cual únicamente se representan la inversión inicial y la ganancia por venta de sales (ver anexos C.10 y C.11). Esta última se considera con un crecimiento anual de un 5.3% [44] igual al índice de producción minera, el impuesto a la renta de primera categoría de 27% [45], y la depreciación de los equipos considerando los años de vida útil mostrados en la tabla 4.12 [46].

Además, se tiene una tasa de descuento a 10 años igual a la tasa libre de riesgo correspondiente a los bonos emitidos por el Banco Central equivalente a 2.8% ([47], [48]).

Tabla 4.12: Años de vida útil

	Depreciación	Depreciación acelerada
Tranques de relave	10	3
Maquinaria y equipos	15	5
Construcciones definitivas	20	6

Finalmente, en la tabla 4.13 se muestran los parámetros que indican la viabilidad del proyecto, el valor presente neto (VAN) el cual alcanza una suma aproximada de 12,900 millones de pesos y la tasa interna de retorno (TIR) cuyo valor llega al 28%.

Tabla 4.13: Parámetros de viabilidad del proyecto.

Parámetro	Valor
VAN [CLP]	12,916,117,590
TIR	28 %

Capítulo 5

Discusión

En primer lugar, se seleccionó la ubicación de los estanques, la cual es cercana a la planta por lo que tiene beneficios respecto a los costos de traslado de la salmuera. Además, al posicionar los estanques a pocos kilómetros de la costa se tiene fácil acceso al puerto de la empresa por lo que se podrían comerciar sales vía marítima y de esta forma abrir el mercado. Otro gran beneficio del territorio seleccionado es que el fundo ya está siendo arrendado a Minera Los Pelambres, entonces se puede suponer que la tramitación para la instalación de los estanques sería menos compleja. También, de la figura A.1 es posible notar que ya existe una red vial usada por MLP y hay obras en el camino hacia los estanques, por lo que es probable que exista una red eléctrica facilitando la instalación y funcionamiento del pipeline.

Por otro lado, en la latitud en la que se posicionarían los estanques la humedad relativa aún es alta, esto es una desventaja considerando que afecta directamente a la tasa de evaporación y por ende a la capacidad del proyecto para producir sales. Otro inconveniente es que el área seleccionada está limitada por las quebradas y esteros aledaños, lo que impediría una ampliación del proyecto. Esto se puede ver con mayor claridad en la figura C.1 del anexo.

Ahora bien, si se observan los datos meteorológicos de la zona en la tabla 4.1, en particular la columna “Ag” con los milímetros de agua caída, es posible notar que el promedio mensual no supera los 0.4 [mm/día]. Luego, comparando este promedio con los datos estudiados en los antecedentes, sección 2.7, donde se menciona que los estanques de evaporación son viables para zonas con una tasa de lluvia menor a 0.3[m/año], es decir 0.8 [mm/día], se puede deducir que el proyecto estaría siendo viable.

5.1. Análisis Energético

La tasa de evaporación (ver tabla 4.3) alcanza un mínimo de 4.45 milímetros por día y un máximo de 8.23 [mm/día], si estos resultados se comparan con la tasa de evaporación mínima expuesta en los antecedentes, la cual indica que debe ser de al menos 1 [m/año] (2.7 [mm/día]), se tiene que, a pesar de que los estanques se ubican en una región no tan árida, se alcanza una tasa suficiente para lograr la evaporación del agua y la decantación de sales, lo que da un segundo indicio de viabilidad del proyecto.

Por otro lado, en la tabla 4.3 también se puede ver el área que sería necesaria para tratar toda la salmuera proveniente de la planta desalinizadora, la cual llega hasta los 11 [km^2] aproximadamente, en los meses en los que la tasa de evaporación es menor. Para tener una superficie que alcance a satisfacer dicha demanda habría que viajar varios kilómetros hacia

el norte del país hasta alcanzar una planicie suficientemente grande, Ovalle pareciera ser el lugar más cercano en el que se podrían instalar unas piscinas de esta magnitud, pero se ubica a 145 [km] aproximadamente, la siguiente opción sería Vallenar que se encuentra a 415[km] de la planta, esta distancia aumentaría los costos de inversión inicial del proyecto puesto que serían necesarios muchos kilómetros más de tuberías, de mayor diámetro, y más bombas de mayor capacidad.

Al observar la figura 4.1 se tendería a pensar que al otro lado de la quebrada se podría hacer una segunda etapa con piscinas, pero esta zona alcanza para $1[km^2]$ solamente y en la actualidad está destinada a la evapotranspiración con eucaliptos del agua de filtrado de concentrado producido en el Puerto Punta Chungo por la misma empresa (MLP). Entonces, si se quisiera aumentar el volumen de salmuera a tratar, manteniendo la ubicación seleccionada, habría que estudiar la opción de utilizar aspersores y/o realizar una evaporación forzada, como se menciona en la sección 2.7.

También, es posible notar de la ecuación 3.2, que el flujo máximo a procesar depende exclusivamente del área y de la tasa de evaporación, por otro lado, la profundidad de los estanques depende únicamente de la tasa de evaporación, pero no existe directa relación entre el flujo y la profundidad. Considerando que la profundidad mínima resultó ser de 2.6[cm] y la profundidad seleccionada es diez veces mayor, entonces es esperable que admita un mayor flujo a tratar, sin embargo, se piensa que es mejor determinar eso mediante pruebas experimentales en un determinado volumen de control, previo al diseño final del proyecto puesto que un aumento de caudal implicaría un aumento en el dimensionamiento del pipeline.

En cuanto a la selección de sales, es necesario destacar que si bien por simplicidad se decidió trabajar con solo tres sales, en realidad al haber más iones presentes en la solución decantarán también otro tipo de sales, probablemente no solo las que se mencionan en la tabla 4.2 si no que también alguna otra con iones que no se tuvieron en consideración para este estudio, por lo que las sales que se produzcan y comercialicen no serán puras. Además, como se ve en la tabla 4.4 el carbonato de calcio y el sulfato de calcio nunca dejan de precipitar.

Por otro lado, considerando lo visto en antecedentes, generalmente en el proceso de precipitación de sales se tienen dos tipos de estanques principales, los estanques concentradores, donde no decanta sal, pero se evapora un gran porcentaje de agua, y los estanques de precipitado. Luego, se tiene que al subdividir la primera piscina en tres, como se muestra en la sección 5.1 tabla 4.6 y dejando el estanque 1.1 para concentrar la salmuera y el resto de los estanques para decantar sales, el diseño del proyecto cumple con lo presentado en antecedentes.

Respecto al balance de energía realizado, en la tabla 4.8 el rango de temperaturas de estabilización que alcanzan los estanques va desde los 10 [°C] a los 23[°C], siendo julio y agosto los meses con menores temperaturas y enero, febrero y diciembre los más cálidos. Teniendo en cuenta que según la sección 2.7 la temperatura de evaporación natural de la salmuera generalmente es de 15[°C] llegando a los 75[°C] en casos de evaporación forzada, los resultados antes presentados se consideran válidos y se establece que en los meses de junio y julio, donde la temperatura de estabilización es levemente menor, serán para realizar mantención a los equipos y limpiezas a los estanques.

Por otra parte, en la tabla 4.8 es posible ver que para todos los estanques se tienen las mismas temperaturas al mes, aún cuando se trabajen sales distintas. Por lo tanto, se ratifica que el supuesto hecho en la memoria de Sousa [30], el cual implica no considerar la energía de disolución de las sales, es correcto debido a que la influencia de la precipitación de cada sal no llega a ser significativa en la transferencia de calor que se produce en los estanques.

En la metodología para conocer la cantidad de sal que se produce se puede notar que el área de los estanques no influye directamente en el tiempo en el que se evapora el agua y por ende en el que decantan las sales, solamente determina la cantidad de sal que se produce. Es posible que si se considerara la temperatura de estabilización de los estanques, mostrada en la tabla 4.8, en la ecuación de la tasa de evaporación 3.1, en promedio con la temperatura ambiente, esta sí logre aumentar la tasa de evaporación y con eso disminuir los tiempos en los que se evapora el agua, y por ende en los que precipitan las sales, como se menciona en la sección 2.7.

Para conocer el impacto real de las temperaturas de estabilización en la tasa de evaporación se realiza una iteración donde se recalcula la tasa de evaporación considerando la temperatura como el promedio entre la temperatura ambiente y la temperatura de la salmuera. En la figura 5.1 se puede observar un gráfico donde se muestran las dos tasas de evaporación, en azul la tasa original (solo considerando la temperatura ambiente) y en verde la tasa posterior a la iteración (considerando el promedio de las temperaturas). En este gráfico es posible notar un leve aumento en la tasa de evaporación para los meses más cálidos alcanzando un máximo de 9 [mm/día].

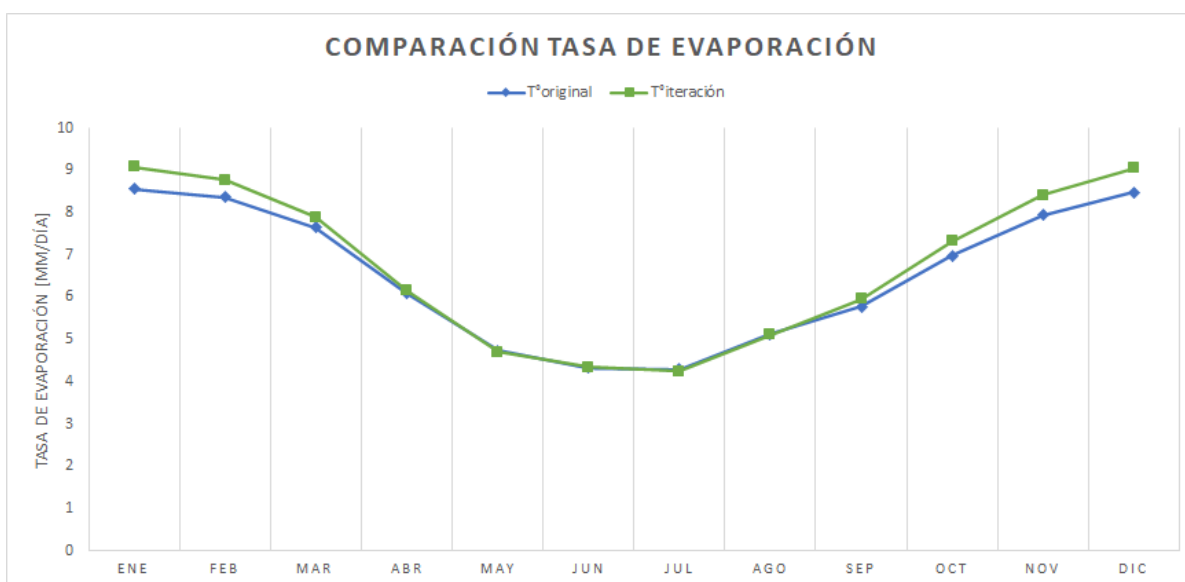


Figura 5.1: Comparación de la tasa de evaporación original y posterior a la primera iteración.

El aumento en la tasa de evaporación, aunque no es tan grande, debiese tener un impacto directo en el tiempo en el que se evapora totalmente el agua en cada estanque, el tiempo en el que se producen las sales y en la cantidad de sales que se generan. Luego, al recalcular estos tres parámetros, manteniendo las áreas determinadas previamente, se tienen los resultados mostrados en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3.

Comparando las tablas 4.4 y 5.1, se puede notar que el carbonato de calcio continúa precipitando desde el primer día, sin embargo, en el cloruro de sodio y el sulfato de magnesio heptahidratado si se distinguen leves diferencias (un día aprox.), en los meses donde se distingue un aumento en la tasa de evaporación la decantación de sales comienza antes y en los meses donde se mantiene se observa un pequeño retraso.

Tabla 5.1: Tiempo en el que comienza a decantar cada sal, con la nueva tasa de evaporación.

Mes/Sal	CaCO ₃	NaCl	MgSO ₄ (7H ₂ O)
Ene	1.2	15.0	17.2
Feb	1.2	15.4	17.8
Mar	1.2	17.0	19.8
Abr	1.2	21.6	25.0
May	1.2	27.8	32.4
Jun	1.2	30.8	35.8
Jul	1.2	30.8	35.8
Ago	1.2	25.8	29.8
Sep	1.2	22.2	25.8
Oct	1.2	18.2	21.2
Nov	1.2	16.0	18.6
Dic	1.2	15.0	17.2

En cuanto a los tiempos de residencia de cada sal en los estanques, a partir del estudio de las tablas 4.5 y 5.2, se tiene que, siguiendo la misma tendencia que en el día en el que comienza la precipitación, el tiempo disminuye alrededor de 0.2 días en los meses con mayor tasa de evaporación y se mantiene o aumenta levemente en los meses donde no hay cambios en el valor de la tasa de evaporación.

Tabla 5.2: Tiempos de residencia con la nueva tasa de evaporación.

Mes/Sal	CaCO ₃	NaCl	MgSO ₄ (7H ₂ O)
Ene	13.6	2.0	0.2
Feb	14.0	2.2	0.2
Mar	15.6	2.6	0.2
Abr	20.2	3.2	0.2
May	26.4	4.4	0.4
Jun	29.4	4.8	0.4
Jul	29.4	4.8	0.4
Ago	24.4	3.8	0.4
Sep	20.8	3.4	0.2
Oct	16.8	2.8	0.2
Nov	14.6	2.4	0.0
Dic	13.6	2.0	0.2

Entonces, el aumento en la tasa de evaporación reduce los tiempos en los que decantan las sales y el tiempo de estadía en cada estanque. Luego, si se observa en detalle las tablas 4.7 y 5.3 es posible notar que las diferencias en la cantidad de sal producida son muy limitadas y no se puede establecer una clara relación entre el aumento en la tasa de evaporación y la cantidad de sal producida. Esto puede deberse al uso de varios decimales en los cálculos y la semejanza entre la tasa original y la tasa post-iteración. Sin embargo, observando los totales

en ambas tablas se tiene que la producción de carbonato de calcio se mantiene prácticamente igual, el cloruro de sodio aumenta en 80 toneladas y el sulfato de magnesio disminuye 52 toneladas, por lo que se considera que la temperatura de estabilización de la salmuera si bien aumenta la tasa de evaporación, este aumento no es tan significativo en la producción de sales.

Tabla 5.3: Cantidad de sales por estanque con la nueva tasa de evaporación

Mes	S1 [Ton]	S2 [Ton]	S3 [Ton]
Ene	2,503	1,558	77
Feb	2,502	1,583	78
Mar	2,503	1,664	99
Abr	2,506	1,652	79
May	2,510	1,654	84
Jun	-	-	-
Jul	-	-	-
Ago	2,506	1,638	86
Sep	2,507	1,672	77
Oct	2,505	1,667	93
Nov	2,502	1,644	48
Dic	2,502	1,520	61
Total [ton]	25,046	16,253	783

Ahora, la temperatura de estabilización de la salmuera luego de aumentar la tasa de evaporación se mantiene prácticamente igual a la temperatura original (ver tabla 5.4), por lo que la influencia del aumento en la tasa de evaporación pareciera ser irrelevante en este parámetro.

Cabe destacar que a partir del estudio de la tabla 4.5 es que se pudo establecer una razón entre los tiempos necesarios para precipitar cada sal y con esta dimensionar los estanques respectivos, pudiendo así lograr que las sales precipiten separadas. Estas áreas no se cambiaron al momento de hacer la iteración dado que se piensa que es mejor mantener las áreas para el peor caso, es decir, para cuando se tenga una tasa de evaporación menor; y si aumenta la tasa de evaporación, entonces es mejor aumentar el caudal de salmuera a tratar.

Finalmente, de este estudio se tiene que al considerar las temperaturas de estabilización de la salmuera efectivamente se observa un aumento en la tasa de evaporación, pero éste cambio no afecta en gran medida la producción de sales ni el tiempo de residencia en cada estanque.

Además, el tiempo aproximado en el que se llega a las temperaturas de estabilización es de 3000[s] aproximadamente, lo que quiere decir que desde que el flujo de salmuera llega a los estanques, fluye lentamente por ellos, ocurre la transferencia de calor y alcanza el equilibrio, pasa menos de una hora, lo que indicaría que la precipitación de sales se produce en poco tiempo, por lo tanto se tiene otro indicio de la factibilidad del proyecto.

Tabla 5.4: Temperaturas de estabilización de la salmuera luego de la iteración con la nueva tasa de evaporación.

Mes	S1 [°C]	S2 [°C]	S3 [°C]	S4 [°C]	S5 [°C]
Ene	22	22	22	22	23
Feb	22	22	22	22	22
Mar	20	20	20	20	20
Abr	16	16	16	16	16
May	13	13	13	13	13
Jun	12	12	12	12	12
Jul	11	11	11	11	11
Ago	11	11	11	12	12
Sep	14	14	14	14	14
Oct	17	17	17	17	17
Nov	19	19	19	19	19
Dic	21	21	21	21	21

5.2. Análisis Ambiental

5.2.1. Servicios Ecosistémicos

Primero que todo, se describen tres clasificaciones para los servicios ecosistémicos, cada una con un lineamiento distinto. La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio está enfocada en las consecuencias del cambio de los ecosistemas en el desarrollo de la vida humana, la Clasificación Internacional Común de Servicios Ecosistémicos busca estandarizar los trabajos de mapeo y valoración de los ecosistemas y La Economía de Ecosistemas y Biodiversidad pretende visibilizar los valores de la naturaleza incorporándola en la toma de decisiones en todo nivel. Si bien estas clasificaciones fueron creadas con diferentes objetivos, su categorización de servicios ecosistémicos es bastante parecida, manteniendo como factor común las divisiones en servicios de aprovisionamiento, regulación y culturales.

A partir de la caracterización de los principales ecosistemas que se encuentran en la zona, hecha por Jaime Illaños y asociados [28] para la evaluación ambiental del proyecto INCO, es posible extrapolar los ecosistemas allí descritos a la zona a intervenir con los estanques de evaporación, siendo el de mayor relevancia el de pradera. Como se observa en la sección 5.2, en el ecosistema de pradera hay diversas especies con algún estado de conservación, lo que podría significar un problema a la hora de solicitar los permisos para intervenir el lugar, por lo que habría que considerar como parte del proyecto el mover ciertas especies a otra zona. Se debe poner especial atención en la presencia de cururos, los cuales se encuentran en categoría de Peligro.

Revisando ahora los servicios que presta el área seleccionada (ver figura 4.5), cómo estos se verían afectados por la instalación de los estanques, y qué servicios podrían proveer los estanques de evaporación, se tiene:

- Aprovisionamiento de agua debido a la presencia de la Quebrada La Palma y el Estero Conchalí. Este último se sitúa a una distancia prudente de donde se instalarían los estanques por lo que el riesgo de contaminación es menor. Por el contrario, la quebrada

se encuentra bastante cercana a las piscinas por lo que si se produjera algún rebalse o falla en los revestimientos de los estanques la quebrada podría verse afectada generando un gran impacto en el medio ambiente aledaño, provocando a su vez contaminación en el embalse que se encuentra un poco más al sur (ver figura C.1). La contaminación del recurso hídrico es algo que se debe evitar a toda costa debido a la escasez del mismo y lo que significaría para el resto de especies que dependen del, además del posible uso que le den a esa agua las comunidades cercanas.

- Todos los ecosistemas proveen recursos genéticos y la modificación de estos genera desequilibrios en los sistemas bióticos y abióticos. En este caso particular, existen además especies endémicas, lo que quiere decir que solo están en esta zona, por lo que tienen un alto valor en la biodiversidad. La instalación de los estanques modificará estos recursos genéticos sacando a las especies de su hábitat natural, reacomodándolas en otro sitio, y posiblemente nuevas especies lleguen, es común que en los salares haya algunos organismos invertebrados y por ende aves que se alimenten de ellos. Esto último debe ser estudiado en mayor profundidad previo a la aprobación del proyecto, puesto que podría influir en la calidad de la sal y, por ende, en su posterior venta.
- En cuanto a los servicios de regulación, la vegetación de la zona cumple una doble función, ya que evita la erosión del suelo manteniendo la calidad del mismo y atrae a especies polinizadoras. Por otro lado, los animales que habitan el área también ayudan a mantener los procesos biológicos. Tanto la vegetación, como los animales que habitan en el sector serán removidos al momento de instalar las piscinas, por lo que ya no habrán servicios de regulación.
- El servicio de hábitat que efectúa la zona, el cual cumple con el mantenimiento de especies de aves migratorias, se verá interrumpido por la instalación de los estanques. Sin embargo, es posible que otras aves lleguen al lugar, especialmente si aparecen otras especies en los salares como se mencionó en el punto de recursos genéticos.
- Los servicios culturales del área en cuestión se verán afectados, pero toda la zona aledaña es similar por lo que se piensa el impacto será más bien por agregar otro espacio de estudio y recreación, donde la población podrá aprender acerca de procesos de evaporación de agua y precipitación de sales. También cambiará el paisaje, pudiendo así inspirar desde otra perspectiva a los visitantes del lugar.

5.2.2. Comparación de la concentración del agua de mar

A partir de la revisión bibliográfica presentada en la sección 2.6 se sabe que los principales problemas de verter la salmuera al océano son la temperatura de esta, su alto grado de salinidad y su composición. En cuanto a la temperatura, se conoce por bibliografía que no habrá una gran diferencia en esta característica entre el agua de rechazo y el agua del mar, esto puede variar dependiendo de los cambios estacionales del océano, pero para este análisis ambiental no se considerará una propiedad relevante. La composición química de la salmuera producida por la planta desalinizadora es igual a la composición del agua de mar, es decir, contienen los mismos iones, por lo que los antiescalantes, biocidas y otros químicos que se utilizarán en el tratamiento del agua no afectan en mayor medida a este punto. Sin embargo, la concentración de estos iones si varía bastante, es prácticamente el doble a la concentración

original, por lo que se estudiará en mayor profundidad los efectos del aumento de salinidad en el agua provocados por el rechazo proveniente de la planta desalinizadora.

Para conocer de manera certera las consecuencias que tiene el aumento de la salinidad del agua, y la velocidad de este aumento, en las especies presentes en el área de descarga de la planta se requieren estudios experimentales, sin embargo, en este análisis se pretende dar un indicio de cómo se vería afectada la línea de base del proyecto INCO mencionada en la sección 2.8.1, a partir de estudios realizados en otras plantas desalinizadoras.

Según la información entregada en los antecedentes (sección 2.6) se sabe que el área más afectada por el aumento de salinidad es la que se encuentra alrededor de los difusores de descarga de la salmuera, por lo que los organismos perturbados directamente por este flujo serán las comunidades planctónicas y quienes se encuentren en la zona submareal de fondo blando. Luego de ver el efecto en estas especies se puede analizar la reacción que tiene en la cadena trófica.

Los principales estudios sobre las consecuencias de la salmuera en las comunidades oceánicas están hechos en el Mar Mediterráneo y el Mar Arábico, pues es ahí donde se encuentran la mayor cantidad de plantas desalinizadoras del mundo. Respecto a lo que pasa con la salinidad y los ecosistemas de la costa chilena no se encontró información, y como las especies son diferentes no se puede analizar el efecto en una especie en particular. Sin embargo, se puede hacer una extrapolación en ciertas comunidades macroinvertebradas bentónicas como poliquetos, crustáceos y moluscos.

La salinidad del océano es aproximadamente de 35 psu (unidades prácticas de salinidad) y se sabe que esta se verá sobrepasada en un radio de 7 metros aproximadamente, según la evaluación ambiental del proyecto INCO [49]. De la tabla 4.9 se tiene que el agua de mar posee una salinidad de 37,451 [ppm], el rechazo de 74,594 [ppm] y el agua que se estaría enviando al mar considerando el 14 % que se va a los estanques es de 64,151 [ppm], pero no se sabe con exactitud su magnitud en unidades prácticas de salinidad, ya que esta depende de la conductividad eléctrica, la temperatura y la profundidad del agua [50]. Pese a lo anterior, se puede hacer una aproximación: 1,000 [ppm] serán 1 [psu] [51], luego la salinidad del área de estudio será aproximadamente 37 [psu] y la salinidad del rechazo a evaluar será de 64 [psu], es decir, el aumento de salinidad en el radio afectado por el flujo de salmuera es de aproximadamente 27 [psu].

Según un estudio del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España [52], en los primeros estadios del ciclo de vida de los moluscos un aumento del orden de 2 [psu] en la salinidad provoca que disminuya su tasa de supervivencia, para el caso de moluscos adultos se requiere un aumento de al menos 5 [psu] para que se vea algún efecto. Esto podría implicar que en el radio que se verá perturbado por la descarga de la salmuera algunas especies de moluscos que habiten la zona se verán considerablemente afectados por el aumento de la salinidad.

En el caso de los crustáceos, según CEDEX [52], estos parecieran tolerar de mejor manera el aumento de salinidad, especialmente en su etapa adulta, pudiendo soportar un aumento de hasta 10 [psu] sin que se noten cambios importantes en la cantidad de individuos presentes. Sin embargo, hay algunas especies más sensibles por lo que no podría llegarse a algo concluyente sin estudiar las especies existentes en el área en cuestión.

Por otro lado, las algas son más tolerantes a los aumentos de salinidad que el resto de los organismos [52], entonces se piensa que las comunidades de la zona submareal de fondos duros serán menos susceptibles a los impactos de la planta desalinizadora.

El estudio de CEDEX concluye que el incremento de salinidad en los ecosistemas ben-

tónicos asociados al área submareal de fondos blandos produce cambios en la abundancia y la estructura de la comunidad, disminuyendo su riqueza y diversidad. CEDEX plantea que generalmente los equinodermos, moluscos y crustáceos se ven reemplazados por poliquetos anélidos y nematodos [52]. Esto brinda un indicio de lo que podría ocurrir con los organismos presentes en la costa chilena, probablemente disminuyan los crustáceos y moluscos y prevalezcan los poliquetos anélidos.

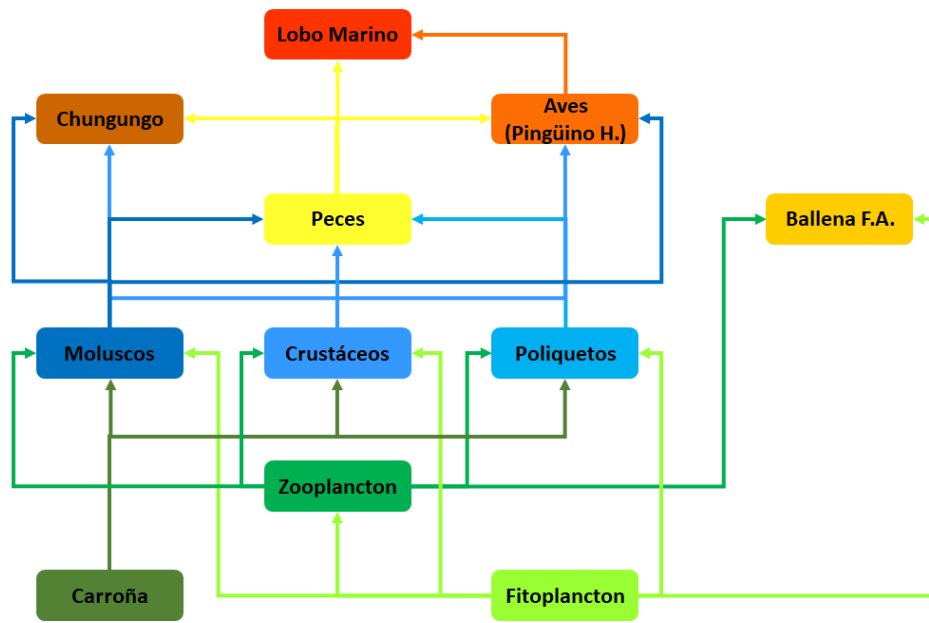
Por otra parte, lo que se observó del estudio de CEDEX es que el incremento de salinidad en 5 o 10 [psu] es importante, por lo que lograr disminuir la salinidad del agua que se vierte al mar, aunque sea un 14 %, podría tener un impacto positivo en los ecosistemas, disminuyendo así el estrés al que se ven sometidos y dando más tiempo para que se adapten a este nuevo ambiente.

Cabe destacar que la estacionalidad también es un factor que influye en las especies que se verán afectadas, pues dependiendo de la temporada se pueden encontrar diferentes organismos y en distintas proporciones.

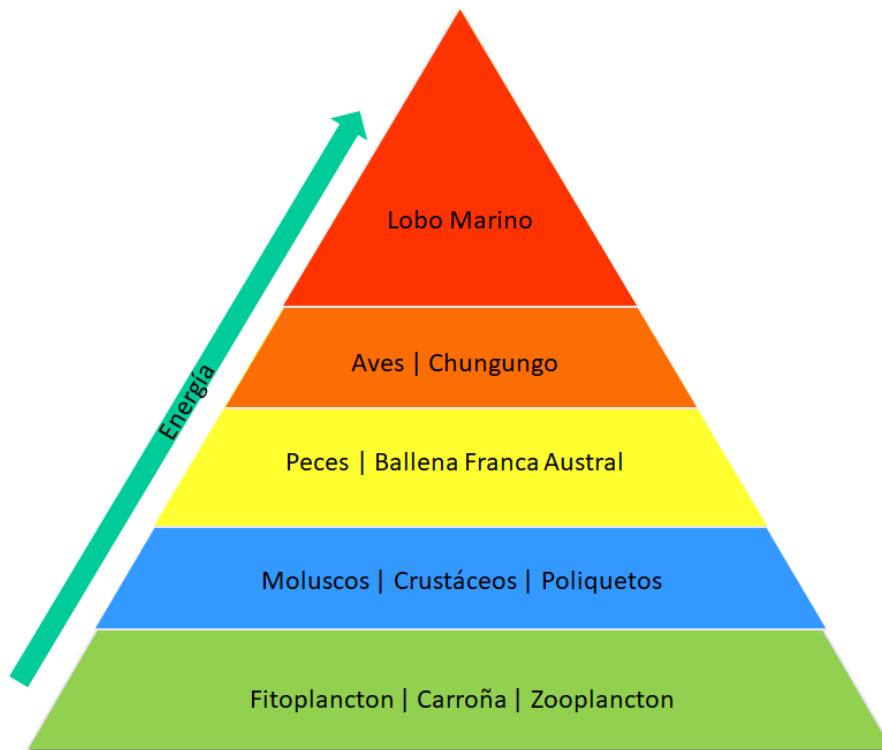
Además, se piensa que el uso de difusores en la descarga a la salmuera ayuda bastante a disminuir el radio afectado por el aumento de salmuera, pero podría buscarse una forma de hacer que la mezcla entre el rechazo y el mar sea aún más eficiente, pues de todas formas se está generando un impacto que a largo plazo puede tener consecuencias importantes.

Finalmente, en la figura 5.2 se pueden observar dos esquemas de lo que sería la cadena trófica, en la figura 5.2 a) se muestra el flujo de energía de cada comunidad y en la figura 5.2 b) se puede ver la pirámide trófica donde se observa en la parte inferior los organismos productores, posteriormente se observan los consumidores primarios y así sucesivamente hasta llegar al depredador principal. Cabe destacar que en esta cadena trófica se incluyeron las principales especies mostradas en la línea de base del proyecto INCO, las cuales fueron enunciadas en la sección 2.8.1.

A partir del análisis antes expuesto y la cadena alimenticia mostrada en la figura 5.2, se puede notar cómo la disminución de ciertos individuos productores y/o consumidores primarios podría afectar a consumidores secundarios y terciarios tales como pingüinos, chungungos y ballenas francas australes. Esto último es de gran importancia debido a que son especies que se encuentran en alguna categoría de conservación, por lo que la reducción de la salinidad lograda por la instalación de los estanques de evaporación adquiere mayor relevancia.



(a)



(b)

Figura 5.2: a) Cadena trófica por individuo. b) Cadena trófica por categoría

5.3. Análisis Económico

A partir del estudio de los beneficios económicos del proyecto (tabla 4.11), es posible notar que la sal que otorga mayores ganancias es el cloruro de sodio. Si se tiene en cuenta que el objetivo de este proyecto no es generar sales de alta pureza, se tiene como cliente objetivo las empresas mineras que utilicen esta sal para sus procesos de lixiviación y para la mantención de sus rutas viales, es decir, descongelar y compactar suelos. Lo anterior podría permitir también una venta interna a la empresa puesto que Antofagasta Minerals y Minera Los Pelambres utilizarían la sal producida por la salmuera proveniente de su propia planta desalinizadora.

Los beneficios económicos producidos por la venta de sales dependerían también de la cantidad de sal necesaria para el proceso de lixiviación. Gabriel Ramírez (Gerente General de KUL) menciona como ejemplo Minera Tres Valles, a quienes su empresa vende aproximadamente 3,000 [Ton/mes] de cloruro de sodio, esto significaría 36,000[Ton/año], teniendo en cuenta que los estanques de evaporación producirían 16,173 [Ton/año] (ver tabla 4.7) sería posible vender la producción total de esta sal, por lo que en cuanto al aspecto de posibilidad de venta de sales se podría considerar un proyecto viable. Sin embargo, el proceso de lixiviación que utiliza sal es un proceso que obtiene cobre a partir del tratamiento de sulfuros, mineral que se encuentra en mayor profundidad por lo que, según el profesor Osvaldo González, se usa en minas que están en sus últimos años de vida y que están intentando extender su vida útil. Esto último implicaría que habría que hacer un estudio de mercado a largo plazo investigando cuántas minas hay que estén ya tratando sulfuros y cuantas otras podrían entrar en esa fase a futuro para saber si un proyecto de 15 años tiene sentido o no.

Por otro lado, está la caliza, esta sal también podría ser usada por la empresa, dado que en el postratamiento del proceso de desalinización de agua de mar se le agrega carbonato de calcio al agua permeada para mejorar sus propiedades y dejarla en calidad industrial. No obstante, debiese estudiarse la cantidad de caliza que requiere el postprocesamiento del agua y si es posible venderla también en otras industrias como la construcción y metalurgia.

Las sales de magnesio no se consideran como beneficio porque al estar tan mezcladas no se pueden vender como un producto puro y los usos de cada sal que contiene el estanque 5 son bastante diferentes. La bischufita se utiliza para hacer biosal o para descongelar caminos, el sulfato de magnesio se utiliza en la industria química y el cloruro de potasio en agricultura, principalmente como fertilizante.

Si se optara por realizar un postratamiento a las sales, es probable que las ganancias aumentarían, dado que se tendrían sales de mejor calidad y el mercado donde vender las sales sería más amplio. Aunque, también aumentarían los costos, esto es algo que se debiese evaluar posteriormente en la medida que el proyecto avance.

Por otro lado y a partir del análisis de los resultados energéticos, se tiene que al aumentar la tasa de evaporación disminuye un poco la producción de sulfato de magnesio, y aumenta levemente el carbonato de calcio y el cloruro de sodio, por lo que los beneficios aumentarían 4.8 millones de pesos aproximadamente (tabla 5.5). Luego, si se realiza el flujo de caja considerando estos beneficios el VAN resultante alcanzaría los 12,976 millones de pesos (ver figuras C.12 y C.13 del anexo), notando un aumento de casi 60 millones de pesos.

Los principales costos que se consideraron para estimar la prefactibilidad del proyecto consistieron en la inversión inicial, correspondiente a materiales y equipos para construir el pipeline y los estanques, y la remoción de tierra. Sin embargo, los costos reales también incluyen costos fijos como la mano de obra para la construcción del proyecto y la operación

Tabla 5.5: Beneficios económicos por venta de sales luego del aumento de la tasa de evaporación.

Sal	Precio unitario [CLP/kg]	Precio Anual x Estanque [CLP]	Marca
CaCO ₃	18.6	465,802,282	CAP
NaCl	59.0	958,904,500	Kul
TOTAL		1,424,706,782	

del mismo, la electricidad, servicios de agua potable para los funcionarios, baños, casino, transporte del personal si es necesario, elementos de protección personal, entre otros. Por otro lado, los costos variables dependerán de la logística para transportar las sales a los clientes, mantenimiento de los equipos y estanques, y el manejo de residuos, en particular, de las sales generadas por la piscina 5 ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$, KCl y $MgCl_2 \cdot 6H_2O$).

Del estudio del flujo de caja mostrado en las figuras C.10 y C.11, se puede determinar que para que el VAN sea negativo los costos totales (fijos más variables) deben alcanzar los 1,450 millones de pesos al año, aproximadamente. Si bien este valor puede parecer muy alto se deben analizar los gastos mencionados en el párrafo anterior para tener una mejor idea de la rentabilidad del proyecto. Para esto se realizaron los siguientes supuestos:

Costos Fijos

- 30 trabajadores con un sueldo aproximado de 1,000,000 [CLP], se incluyen ingenieros, personal de mantenimiento, operarios de máquinas y personal para la recolección de sales.
- Se estima el valor de la electricidad según su precio en Los Vilos [53], siendo este de aproximadamente 100 [CLP/kW] y se considera la potencia de las bombas de 200 [kW], operando durante 305 días.
- Se estima el almuerzo de los empleados, incluyendo los meses de mantenimiento, a un precio de 4,000 [CLP].
- Bus de acercamiento para el personal cuyo costo diario es de 200,000 [CLP], aproximadamente 7,000 [CLP] por persona. Este precio se obtuvo de la búsqueda de pasajes en la empresa Pullman Bus <https://www.pullmanbus.cl/services> [54]
- Se estimó el arriendo de 4 baños modulares tipo container en 1,000,000 [CLP/mes]. Para este ítem no se logró encontrar un valor asociado y las cotizaciones realizadas no fueron respondidas, por lo cual se consideró el precio de un container tipo oficina de la empresa JR Contenedores cuya oferta está disponible en la página web <https://www.yapo.cl/> [55].

Costos Variables:

- Mantenimiento de equipos, se estimó que el mantenimiento de los equipos principales (bombas) sería de aproximadamente 30,000,000 [CLP] al año.
- En cuanto a la logística del traslado de las sales para su venta se consideraron 1,249 camiones tolva cuya capacidad es de 33 [Ton] y su valor unitario es de 700,000 [CLP]. Este valor se obtuvo a partir de la conversación con Gabriel Ramirez.

En la tabla 5.6 se puede observar un resumen de lo mencionado anteriormente y el costo total del proyecto con un 15 % extra por posibles faltas en las estimaciones.

Tabla 5.6: Resumen de la estimación de costos del proyecto.

Costos Fijos	Valor [CLP]
Electricidad	145,802,879
Sueldos	360,000,000
comida	28,800,000
transporte de personal	40,000,000
Baños	48,000,000
Costos Variables	Valor [CLP]
Mantenimiento	30,000,000
Logistica	1,071,611,725
TOTAL	1,724,214,604
TOTAL + 15 %	1,982,846,794

Para verificar si los gastos expuestos en la tabla anterior (tabla 5.6) tienen sentido se compara el costo por metro cúbico del proyecto de estanques de evaporación (considerando $240,000 [m^3]$), cuyo valor alcanza aproximadamente los $\$11[US/m^3]$, con el costo expuesto en los antecedentes (sección 2.5), el cual tiene por límite superior un precio de $\$10.04 [US/m^3]$. Como se puede observar son valores similares, por lo que se consideran aproximaciones válidas.

Finalmente, como se observa en la tabla 5.6 la suma de los costos fijos y variables supera en alrededor de 500 millones de pesos los costos máximos aceptados según el flujo de caja del proyecto, si a esto se le agregan las sales que no serán vendidas y que se tienen que desechar de alguna forma, se tiene que el proyecto no sería rentable. No obstante, esta situación podría cambiar si es que se considerarían inversionistas o créditos durante el desarrollo del proyecto. Además, el VAN que se obtendría contando en el flujo de caja los costos fijos y variables recientemente expuestos alcanzaría los -5,145 millones de pesos. Por otro lado, si se hiciera el ejercicio anterior con el VAN obtenido luego de aumentar la tasa de evaporación los números serían bastante similares, con un leve aumento en el valor presente (-5,074 millones de pesos) y por ende en los costos que es capaz de absorber.

Capítulo 6

Conclusiones

El presente trabajo de título tenía por objetivo general evaluar el proyecto de instalación de estanques de evaporación para tratar la salmuera proveniente de plantas desalinizadoras desde un punto de vista energético, ambiental y económico; éste se considera logrado al cumplir con los objetivos específicos planteados, los que se enumeran de la siguiente manera: (1) evaluar la tasa de evaporación del proceso y sus impactos en el dimensionamiento de los estanques y la temperatura de estabilización del fluido; (2) determinar las sales y su tasa de producción a partir de la evaporación del rechazo; (3) describir el impacto ambiental del rechazo en el océano, y de la instalación de los estanques de evaporación; y (4) evaluar los costos y beneficios económicos de la instalación de estanques de evaporación.

Se considera un proyecto viable en los aspectos energéticos y ambientales, puesto que la tasa de evaporación es lo suficientemente alta para evaporar toda el agua en tiempos razonables (un mes aproximadamente) y la tasa de agua caída al año es bastante baja, logrando así producir sales. Además, con la cantidad de salmuera que se alcanza a tratar se reduce en al menos 10 [psu] la salinidad del rechazo que llega al océano, considerándose esta una reducción significativa para el ecosistema marino. En cuanto al ámbito económico, si bien existe mercado para vender las sales, los costos de producción son algo mayores a los beneficios por la venta de las mismas, por lo que se concluye que no es un proyecto rentable económicamente hablando. No obstante, el proyecto aún podría presentar rentabilidad económica si se considerará algún incentivo.

Si bien el proyecto logra disminuir la salinidad de la salmuera que va a parar al mar, se cree que la solución para proteger el medio ambiente marino está en mejorar los procesos de desalinización haciéndolos más eficientes y tratando previamente el rechazo para bajar su concentración antes de verterlo al mar, agregando también más difusores para reducir el radio de impacto.

Por otra parte, aún si se lograsen reducir los costos variables del proyecto al punto de alcanzar la rentabilidad económica, este podría ser difícil de replicar en plantas de mayor tamaño debido al espacio de tierra que requieren los estanques de evaporación, siendo el área una de las principales complicaciones, junto con los costos de logística para la venta de las sales obtenidas.

Cabe destacar que se probó que la temperatura de estabilización de la salmuera aumenta la tasa de evaporación, provocando que se reduzcan los tiempos en los que se evapora el agua, sin embargo, los cambios no fueron tan relevantes para la producción de sales. Además, se probó que la entalpía de disolución de las sales no influye mayormente en el balance de energía ratificando la hipótesis de Sousa [30].

Se propone para futuros estudios investigar sistemáticamente las consecuencias del aumento de salinidad en las comunidades bentónicas de la costa chilena, esto debido a que no se encontró información de este tipo y podría ser significativa para las próximas plantas desalinizadoras que se instalen en el país. Además, si se supiera cuantitativamente cómo se vería afectado el medio ambiente marino por este tipo de industria se podría cobrar algún impuesto por contaminación ambiental a las empresas que contaminen la zona submareal u otorgar algún beneficio a aquellas que reduzcan su impacto, por lo que la rentabilidad actual del proyecto podría verse modificada auspiciosamente.

También, se sugiere estudiar otros usos para el rechazo, así como la acuicultura, los estanques de gradiente solar, el uso de la salmuera en invernaderos y posterior producción de energía, la utilización del rechazo para fabricar concreto, entre otros.

Finalmente, se invita al lector a buscar, desarrollar, implementar y estudiar iniciativas que promuevan el desarrollo sustentable y sostenible. La escasez hídrica, la contaminación de los océanos, la sobreexplotación de recursos y el calentamiento global son algunos de los problemas que tiene la humanidad hoy en día y que, si no se abordan pronto, pueden tener grandes consecuencias en la sociedad. Se invita entonces, a tener una mirada más amigable con el medio ambiente tanto en el diario vivir como en el desarrollo de su profesión y así contribuir a un mejor futuro para las nuevas generaciones.

Bibliografía

- [1] Oriana Fernández. Sequía: comunas con decreto de escasez hídrica ascienden a 136 - La Tercera, 3 2020.
- [2] CNN. La mega sequía podría ocasionar racionamiento de agua antes de lo esperado, 1 2020.
- [3] El Mercurio. Megasequía impulsa desarrollo de desaladoras en Chile: ya hay 24 plantas operando y hay otros 22 proyectos en diferentes etapas de avance - CPI, 10 2019.
- [4] RAE. desalar | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE.
- [5] RAE. desalinizar | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE.
- [6] Edward Jones, Manzoor Qadir, Michelle T.H. van Vliet, Vladimir Smakhtin, and Seong mu Kang. The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657:1343–1356, 2019.
- [7] Ministerio de Medio Ambiente. Servicios Ecosistémicos – MMA.
- [8] ecosistema | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE.
- [9] Gustavo Aimone Arredondo. Desalación del agua de mar, una alternativa de progreso para Chile – Revista de Marina, 2 2020.
- [10] ONU. Agua y saneamiento – Desarrollo Sostenible.
- [11] ONU. Informe de los objetivos del desarrollo sostenible. *Informe de los objetivos del desarrollo sostenible 2019*, page 64, 2019.
- [12] CMNU. CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO. Technical report, 1992.
- [13] Agenda País. Primera planta desalinizadora estatal del país inaugurará operaciones en septiembre - El Mostrador, 3 2020.
- [14] IDE Tech. ¿Qué es la desalinización? | IDE Technologies, 2018.
- [15] F. L. Moreno, M. Raventós, A. Zambrano, Y. Ruiz, and E. Hernández. Effect of separation and thawing mode on block freeze-concentration of coffee brews. 2015.
- [16] G. Dévora, R. González, and Saúl Ruiz. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Scielo*, 4, 10 2012.
- [17] José Morillo, José Usero, Daniel Rosado, Hicham El Bakouri, Abel Riaza, and Francisco Javier Bernaola. Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination*, 336(1):32–49, 2014.

- [18] Acciona. proceso-desalacion-agua-infografia.jpg (1280×4500).
- [19] Guido Soto Álvarez and Manuel Soto Benavides. *Desalación de agua de mar mediante sistema Osmosis Inversa y Energía Fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, Región de Coquimbo*, volume 1. 2013.
- [20] Argyris Panagopoulos, Katherine Joanne Haralambous, and M. Loizidou. Desalination brine disposal methods and treatment technologies - A review. *Science of the Total Environment*, 693:133545, 2019.
- [21] Nadeem Ahmad and Raouf E. Baddour. A review of sources, effects, disposal methods, and regulations of brine into marine environments. *Ocean and Coastal Management*, 87:1–7, 2014.
- [22] David A. Roberts, Emma L. Johnston, and Nathan A. Knott. Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. *Water Research*, 44(18):5117–5128, 2010.
- [23] Charissiadis Christos. Salmuera – Descarga Cero de Líquidos (ZLD) Fundamentos e Ingeniería. 2018.
- [24] Jing Zhao, Huaigang Cheng, Xiao Wang, Wenting Cheng, and Fangqin Cheng. Experimental investigation and cost assessment of the salt production by solar assisted evaporation of saturated brine. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(4):701–707, 2018.
- [25] Mushtaque Ahmed, Walid H. Shayya, David Hoey, Arun Mahendran, Richard Morris, and Juma Al-Handaly. Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants. *Desalination*, 130(2):155–168, 2000.
- [26] Domingo Zarzo Martinez. Problemática y soluciones para la gestión y tratamiento de salmueras procedentes de desaladoras. pages 1–266, 2017.
- [27] Jaime Illanes y Asociados. Minera los pelambres estudio de impacto ambiental proyecto infraestructura complementaria -Descripción del proyecto. 2016.
- [28] Jaime y Asociados Illanes. Infraestructura Complementaria Línea de Base, Sección IIIId. 2016.
- [29] D. Glen Akridge. Methods for calculating brine evaporation rates during salt production. *Journal of Archaeological Science*, 35(6):1453–1462, 2008.
- [30] Maria Luís Almeida e Sousa. *SOLAR EVAPORATION SYSTEM : MODELING AND CONTROLLING BRINE TREATMENT PONDS*. PhD thesis, 2016.
- [31] Robert H Perry, Don W. Green, and James O. Maloney. *CHEMICAL ENGINEERS ' HANDBOOK SEVENTH Late Editor*. 1997.
- [32] CRANE. *Flow of fluids - Through valves, fittings, and pipe*. New York, 1981.
- [33] Norma Chilena. Ingeniería sanitaria - Alcantarillado de aguas residuales - Diseño y cálculo de redes, 2008.
- [34] TIGRE. Polietileno de alta densidad, 2011.
- [35] Goodfellow. Polietileno - Alta Densidad - Catalogo en linea.

- [36] Harold Alfred Mooney. *Millenium Ecosystem And Human Well-Being*. Number May 2017. 2005.
- [37] Roy Haines-Young and Marion Potschin. Common International Clasification of Ecosystem Services CICES V5. 1. Guidance on the Application of the Revised Structure. *Fabis Consulting*, (January):53, 2018.
- [38] TEEB.
- [39] Edward; Barker Tom; Mortimer Martin; Perrings Charles; Aroson James; De Groot Rudolf; Fitter Alastair; Mace Georgina; Norberg Jon; Sousa Pinto Isabel; Ring Irene Elmqvist, Thomas; Maltby. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: The Ecological and Economic Foundations. Chapter 2: Biodiversity, ecosystems and ecosystem services. *Biological Psychiatry*, (9 SUPPL. 1):96, 2010.
- [40] GesNat. NOVENO INFORME TRIMESTRAL (ENERO - MARZO 2015) DE ACCIONES / ACTIVIDADES COMPROMETIDAS “ PROYECTO EMBALSE LAS VACAS SUR ” RESOLUCIÓN EXENTA N ° 32 / 2012. pages 0–11, 2015.
- [41] Jaime y Asociados Illanes. Infraestructura Complementaria, Línea de Base, Sección II. 2016.
- [42] Jaime y Asociados Illanes. Infraestructura Complementaria Línea de Base, Sección IV. 2016.
- [43] Vinilit. Catalogo de Precios Vinilit, 2018.
- [44] Instituto Nacional de Estadísticas. Sectores Económicos, Índice de producción Industrial. 251, 2019.
- [45] Servicio de Impuestos Internos. Impuestos Directos, 2020.
- [46] SII | Servicio de Impuestos Internos. Vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado.
- [47] Banco Central de Chile. Base de Datos Estadísticos, 12 2020.
- [48] Banco Central de Chile. Reg.7049, 2016.
- [49] Jaime y Asociados Illanes. Infraestructura Complementaria Línea de Base, Sección IIIb. Technical report, Los Vilos, 2016.
- [50] Jennifer Bergman. Salinidad, Sales Disueltas, Medición de la Salinidad - Ventanas al Universo, 8 2001.
- [51] Francisco Rueda. Residuos de la desalación. Technical report, Universidad de Granada, Granada.
- [52] CEDEX Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Umbrales de tolerancia al incremento de salinidad de diversas especies marinas. *Informe técnico*, Madrid:1– 119, 2012.
- [53] Artículo N°, N° De, Ministerio De Economía, Fomento Reconstrucción, Ley N°, De De, Los Decretos N°, N° De, N° De N° De, Ministerio De Energía, Exentas Cne, C N E N° De, El Bosque, La Estrella, and La Serena. Tarifas de Suministro Eléctrico - 1 de diciembre de 2019 CGE. 2019.
- [54] Pullman Bus | Pasajes de Bus.

[55] Todo contenedores modular, Región Metropolitana | yapo.cl.

Anexo A

Antecedentes

A.1. Ubicación de la planta de MLP



Figura A.1: Mapa de las instalaciones de Minera Los Pelambres, extraído del documento de evaluación ambiental



Figura A.2: Imagen satelital de Puerto Punta Chungo donde está en construcción la planta desalinizadora de MLP

A.2. Composición del agua

Integrated Membranes Solutions Design Software, 2018

Creado en 18-02-2020 08:55:30



Contrapresión permeado (Variable), Turbo(80,4 %)

Nombre del proyecto	MLP_INCO			página : 1/4
Calculado por	Ezequiel		Flujo/tren de permeado	749,00 m3/h
Caudal bomba alta presión	1498,00 m3/h		Flujo de producto total	1498,00 m3/h
Presión de alimentación	61,2 bar		Number of trains	2
Temperatura de alimentación	12,0 °C(53,6°F)		el flujo de agua cruda / tren	1498,00 m3/h
pH agua alimentación	7,50		Conversión	50,00 %
Dosis quimico,mg/l, 98 %	9,4 H2SO4		Edad elemento	5,0 años
Presión de escape de la turbina	0,30 bar		Disminución de flujo %, por año	5,6
Presión de sobrealimentación turbo	24,25 bar		Factor de ensuciamiento	0,75
Energía específica	2,56 kwh/m3		Aumento de SP, per año	7,0 %
NDP paso	23,4 bar			
Flujo promedio	14,4 l/mh			

Paso - Etapa	Perm. Caudal m3/h	Caudal Alimentación m3/h	Tubo Conc m3/h	Flujo l/mh	DP bar	Flujo Max l/mh	Beta	Tipo de alimentación			Pozo salobre sin ensuciamiento			PV# x Elem #
								Presión por etapas bar	Boost bar	Conc bar	Perm. mg/l	Elemento Tipo	Elemento Cantidad	
1-1	748,7	7,5	3,7	14,4	0,6	26,3	1,05	1	24,2	60,6	279,5	SWC6-LD	1400	200 x 7M

Ion (mg/l)	Agua bruta	Agua de alimentación	Permear agua	Rechazo 1	Post Treatment
Dureza, como CaCO3	6652,79	6652,79	12,162	13287,4	53,513
Ca	448,00	448,00	0,819	894,8	17,360
Mg	1350,00	1350,00	2,468	2696,3	2,468
Na	11400,00	11400,00	99,836	22689,9	99,991
K	444,00	444,00	4,857	882,7	4,857
NH4	0,00	0,00	0,000	0,0	0,000
Ba	0,000	0,000	0,000	0,0	0,000
Sr	7,000	7,000	0,013	14,0	0,013
H	0,00	0,00	0,001	0,0	0,001
CO3	5,82	0,91	0,000	4,3	1,624
HCO3	143,00	141,30	2,067	278,0	48,969
SO4	4048,78	4057,81	8,275	8103,7	8,275
Cl	19600,00	19600,00	159,602	39022,8	159,840
F	0,00	0,00	0,000	0,0	0,000
NO3	0,00	0,00	0,000	0,0	0,000
PO4	0,00	0,00	0,000	0,0	0,000
OH	0,00	0,00	0,000	0,0	0,000
SiO2	0,00	0,00	0,000	0,0	0,000
B	4,71	4,71	1,418	8,0	1,418
CO2	0,92	5,75	5,75	5,75	0,13
NH3	0,00	0,00	0,000	0,00	0,000
TDS	37451,31	37453,73	279,36	74594,50	344,81
pH	8,30	7,50	5,83	7,76	8,86

Saturaciones	Agua bruta	Agua de alimentación	Rechazo	Límites
CaSO4 / ksp * 100, %	36	37	87	400
SrSO4 / ksp * 100, %	35	35	84	1200
BaSO4 / ksp * 100, %	0	0	0	10000
Saturación de SiO2, %	0	0	0	140
CaF2 / ksp * 100, %	0	0	0	50000
Indice de saturación Ca3 (PO4) 2	0,0	0,0	0,0	2,4
CCPP, mg/l	36,87	28,40	118,13	850
Fuerza ionica	0,75	0,75	1,49	
Presión osmotica, bar	25,6	25,6	50,9	

Los cálculos del rendimiento del producto se basan en el rendimiento nominal de los elementos cuando se operan con un agua de aporte de una calidad aceptable. Los resultados mostrados en los documentos producidos por este programa son estimaciones del rendimiento del producto. No existe ninguna garantía del rendimiento del producto o del sistema ni expresa ni implícita salvo que se disponga de un comunicado de garantía por separado firmado por un representante autorizado de Hydranautics. Los cálculos de consumos químicos se proporcionan por comodidad y se basan en varias suposiciones de la composición y calidad del agua. Hydranautics no garantiza los consumos de productos químicos, porque los productos químicos necesarios para el ajuste de pH dependen del agua de aporte y no de la membrana. Si necesita una garantía de producto o de sistema, contacte con su representante de Hydranautics. Las garantías no estándar, o las ampliaciones de garantía pueden suponer precios distintos a los previamente acordados. Version : 2.226.84 %
 Email : imsd-support@hydranauticsprojections.net www.membranes.com +1 760 901 2500

Figura A.3: Resultados del software que analiza el agua que se extraerá del mar y la posible composición del rechazo que se devolverá al mar.

Anexo B

Metodología

B.1. Análisis energético

Código B.1: Modelo energético en MATLAB

```
1
2 % Balance ahora sabiendo los tiempos de residencia de las sales
3
4 % Uso de estanques de evaporación para tratar el rechazo proveniente de una
5 % planta desalinizadora ( analisis energético , ambiental y económico)
6 % Autora: Paula Pinto Pozo
7 % Profesor guía: Rubén Fernández
8 % Universidad de Chile
9
10 %=====Datos meteorológicos
11     ↪ =====
12
13 % Temperatura ambiente promedio mensual [C]
14 T = [17.15 17.58 17.01 15.38 13.74 13.38 11.66 11.64 11.96 13.28 14.73 15.74];
15 Tk = T + 273.15; % Temperatura en [K]
16
17 % Temperatura de ingreso de la salmuera [C]
18 Tsal = 12;
19
20 % Temperatura del suelo [C]
21 Tsuelo = [27.55 27.44 23.92 18.72 14.89 12.23 10.89 12.63 16.34 19.56 23.38 26.18];
22
23 % Velocidad del viento [m/s]
24 U = [2.96 2.90 2.37 1.56 1.16 1.26 1.37 1.41 1.91 2.11 2.85 3.25];
25
26 % Humedad Relativa [%]
27 H = [64.1 67.2 71.3 74.3 72.5 72.3 71.8 59.6 65.4 56.7 56.8 59.4];
28 Hp = H./100;
29
30 % Radiación Global [W/m^2]
```

```

31 R = [304.60 299.79 286.97 241.91 190.41 172.28 178.38 203.37 234.19 265.92 285.80 299.73];
32 Rj= R.*0.0864; % Radiación global en [MJ/m^2día]
33
34 % Radiación global horizontal [W/m^2]
35 Rh = [339.42 304.15 254.15 185.26 129.69 109.62 118.18 150.56 200.08 259.48 308.58 341.40];
36
37 % Índice de nubosidad
38 N = [0.09 0.09 0.07 0.10 0.12 0.11 0.12 0.14 0.15 0.14 0.14 0.11];
39
40 % Calor latente de evaporación [MJ/kg]
41 L = 2.501 - 0.002361*T;
42
43 %====Información de la salmuera
44 ↪ =====
45 % Concentración inicial de NaCl en porcentaje masa
46 S = 5.675;
47
48 % Masa del agua evaporada mínima para cristalizar [kg]
49 mw = 0.8421;
50
51 % Masa de la sal cristalizada [kg]
52 ms = mw*(1.52*10^(-4)*S^2 + 9.50*10^(-3)*S);
53
54 % Concentración de sodio [mol/L]
55 m = 0.987;
56
57 %====Cálculo de la tasa de evaporación
58 ↪ =====
59
60 % Coeficiente de activación del agua
61 aw = -0.0011*m^2 - 0.0319*m + 1;
62
63 % Presión de saturación del vapor [kPa]
64 es = 0.6108*aw.*exp(17.27.*T./(237.3+T));
65
66 % Densidad de la solución de NaCl [kg/m^3]
67 Dm = 1043; % [kg/m^3]
68
69 % Concentración inicial de NaCl en porcentaje masa
70 S = 5.675;
71
72 % Gradiente de la presión de vapor [kPa/C]
73 delta = 4098.*es./((237.3+T).^2);
74
75 % Presión atmosférica [kPa]
76 P = 101.3*((293-0.0065*224)/293)^5.26;
77
78 % Constante psicrometrica [kPa/C]
79 gamma = 0.000655*P;

```



```

79
80 % Presión de vapor [kPa]
81 e = H.*es./100;
82
83 % Función del viento [m/s]
84 fu = 6.43.*(1+0.536.*U);
85
86 % Tasa de evaporación [mm/día]
87 E = (1./(L.*(delta+gamma))).*((Rj.*delta)+fu.*(es-e).*gamma);
88 Em = E./1000; % Tasa de evaporación [m/dia]
89 Eav = mean(Em); % Tasa de evaporación promedio [m/dia]
90
91
92 %=====Dimensionamiento de los estanques
93     ↪ =====
94
95 % Volumen diario [m^3/dia]
96 V = 40176/7;
97
98 % Área de cada estanque [m^2]
99 Ae1 = 1333300; % Primeras sales
100 Ae11 = 666650; % CaCO3 + CaSO4
101 Ae12 = 444430; % CaCO3 + CaSO4
102 Ae13 = 222220; % CaCO3 + CaSO4
103 Ae2 = 222200; % Segundas sales NaCl
104 Ae3 = 44500; % Terceras sales MgSO4(7H2O)
105
106 % Profundidad mínima [m]
107 d = 0.20;
108
109
110 %=====Balance de masas
111     ↪ =====
112
113 % Flujo molar de las sales [mol/s]
114 ms1 = 8.82; % CaCO3
115 ms2 = 1.48; % CaSO4
116 ms3 = 65.59; % NaCl
117 ms4 = 1.50; % KCl
118 ms5 = 3.02; % MgCl2(6H2O)
119 ms6 = 4.12; % MgSO4
120
121 % Capacidad calorífica de la salmuera a presión constante según MIT
122 O = ones(1,12); % Vector de unos
123 Sal = S.*O; % Salinidad de la salmuera hecha vector [%
124     ↪ masa]
125 Pat = P.*O; % Presión atmosférica hecha vector [kPa]
126 cp = SW_SpcHeat(Tk,'K',Sal,'% ',Pat,'kPa'); % [J/kgK] Función extraida del MIT

```

```

126
127 % Entalpías de formación de las sales [J/mol]
128 DH1 = -0*1000; % CaCO3
129 DH2 = -21.3*1000; % CaSO4
130 DH3 = 4.9*1000; % NaCl
131 DH4 = 18.4*1000; % KCl
132 DH5 = -14.2*1000; % MgCl2(6H2O)
133 DH6 = 13.3*1000; % MgSO4(7H2O)
134
135 %=====Transferencia de calor
136 ↪ =====
137
138 % Transferencia de calor por entalpía de formación de sales [W/m2]
139 Qh = [(DH1*ms1+DH2*ms2)/Ae11 (DH1*ms1+DH2*ms2)/Ae12 (DH1*ms1+DH2*ms2)/
140 ↪ Ae13 (DH3*ms3/Ae2) (DH4*ms4+DH5*ms5+DH6*ms6)/Ae3];
141
142 % Transferencia de calor por convección
143 hc = 2.8 + 3.*U; % Coeficiente de convección [W/m^2C]
144
145 % Transferencia de calor por evaporación
146 Psa = [0.0196 0.0201 0.0194 0.0175 0.0157 0.0154 0.0137 0.0137 0.014 0.0153 0.0168 0.0179];
147 ↪ % Presión del vapor de agua a temperatura T [bar]
148 Psapa = Psa.*100;
149 ↪ % Presión [kPa]
150 qev = L.*Em.*Dm.*10^6/86400;
151 ↪ % Calor por evaporación [W/m^2]
152
153 % Transferencia de calor por conducción
154 k = 0.4; % Conductividad térmica del HDPE [W/mK]
155 l = 0.05; % Espesor del revestimiento [m]
156 kl = k/l; % Constante de conducción [W/K]
157
158 % Transferencia de calor absorbida de la radiación
159 Fs = (1-0.06); % Fracción solar absorbida por la salmuera
160 qin = Fs.*Rh; % Calor incidente en los estanques [W/m^2]
161
162 % Transferencia de calor por radiación
163 Emi = 0.96; % emisividad del agua según cengel
164 sigma = 5.6704E-8; % constante de Stefan-Boltzmann [W/m^2K^4]
165 ES = Emi*sigma; % Multiplicación de constantes[W/m2K]
166
167 dt = 5; % Delta de tiempo
168 t = 7000; % tiempo máximo en [s]
169
170 max_error = 1e-08; % Error máximo
171 Tb = ones(5,12).*12; % Vector auxiliar para temperaturas de estancamiento de la
172 ↪ salmuera [C]
173 Qtot = ones(5,12); % Vector auxiliar para el calor cuando la temperatura es máxima
174 ↪ en la salmuera [C]
175 tc = ones(5,12); % Vector auxiliar para obtener el tiempo al que se alcanza la

```

```

    ↪ temperatura de estancamiento [s]
169 tp = 1;           % Variable que itera
170
171 for i = 1:5       % para el i-ésimoestanque
172     for j = 1:12  % para el j-ésimomes
173
174         while tp <= t
175             Qtot(i,j) = qin(j)-qev(j)+hc(j).*(T(j)-Tb(i,j))+kl.*(Tsuelo(j)-Tb(i,j))+ES.*(
    ↪ Tk(j).^4-(Tb(i,j)+273.15).^4)-Qh(i);
176             Tb_new(i,j+1) = tp.*Qtot(i,j)./(Dm.*d.*cp(j))+Tb(i,j);
177
178             er = abs(Tb_new(i,j+1)- Tb(i,j));
179
180             if er<max_error
181                 tc(i,j)=max(tp);
182                 break
183             end
184
185             Tb(i,j)= Tb_new(i,j+1);
186             tp = tp + dt;
187
188         end
189     tp = 1;
190 end
191 end

```

Anexo C

Resultados

C.1. Análisis Económico

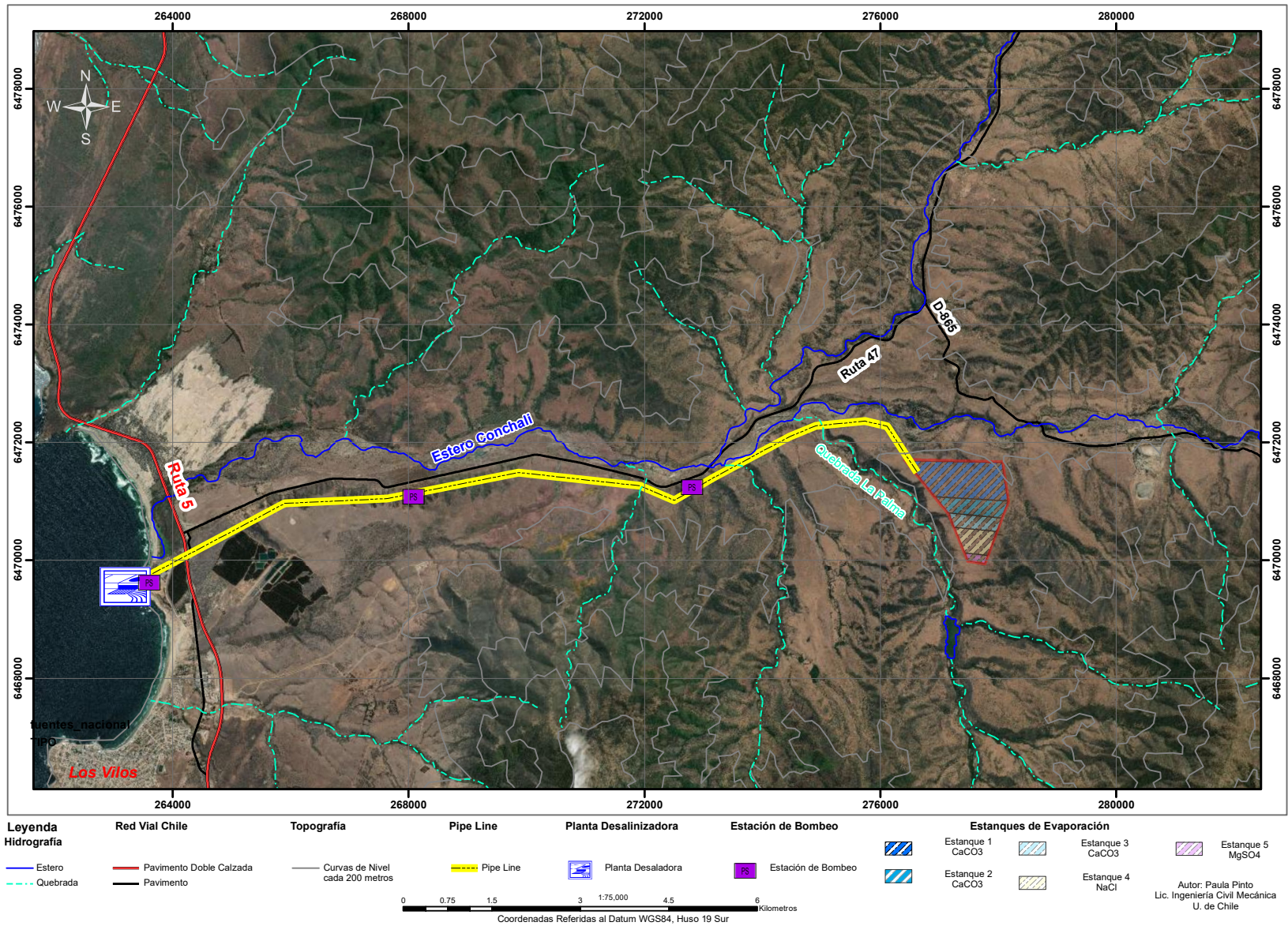


Figura C.1: Pipeline desde la planta desalinizadora hasta los estanques de evaporación.

CERTIFICADO DE AVALÚO FISCAL

Avalúos en pesos del SEGUNDO SEMESTRE DE 2020

Comuna : LOS VILOS
Número de Rol de Avalúo : 00249 – 00004
Dirección o Nombre del bien raíz : FUNDO EL MOLLAR
Destino del bien raíz : FORESTAL

AVALÚO TOTAL	: \$	339.999.743
AVALÚO EXENTO DE IMPUESTO	: \$	145.821.017
AVALÚO AFECTO A IMPUESTO	: \$	194.178.726

El avalúo que se certifica ha sido determinado según el procedimiento de tasación fiscal para el cálculo del impuesto territorial, de acuerdo a la legislación vigente, y por tanto no corresponde a una tasación comercial de la propiedad.

Por Orden del Director**CERTIFICADO GRATUITO**

Figura C.2: Avalúo Fiscal Fundo El Mollar.



TUBERÍA PE 100 PN16

Código	Diámetro	USD/m
2029362*	63mm	7,86
2029366*	75mm	7,86
2029372*	90mm	14,61
2029381*	110mm	22,47
2029386	125mm	28,09
2029390*	140mm	35,95
2029396*	160mm	47,19
2029400*	180mm	60,67
2029403*	200mm	74,15
2029409*	225mm	93,25
2029415*	250mm	115,72
2029420*	280mm	143,81
2029425*	315mm	183,13
2029433*	355mm	332,56
2029438*	400mm	294,36
2029448*	500mm	459,51
2029454*	560mm	575,23
2029459*	630mm	729,15

Figura C.3: Cotización de tuberías Vinilit.



Wellford Chile S.P.A.
 Camino lo Infante N° 1571 - San Bernardo
 Fono: 285 72651 - eMail: ventas@wellford.cl

RUT: 96.546.520-0
COTIZACIÓN

N° 30.994

PAG: 1

Razón social	WELLFORD CHILE SpA	RUT	96.546.520-0
Dirección	CAMINO LO INFANTE 1571	Fecha	09/12/2020
Comuna	SAN BERNARDO	Fono	2 28572651
Forma de pago		Plazo entrega	
Att.		Validez	5 días

Comentarios	- BOMBA PARA 240M3/H CON 16BAR - SE PRESENTAN DOS ALTERNATIVAS
-------------	---

+ ALTERNATIVA N°1 - BOMBA CENTRIFUGA DE SUPERFICIE DE UNA ETAPA + POR FAVOR CONSIDERAR QUE EL MOTOR GIRA A 2975RPM, POR LO QUE LA ALTURA MANOMETRICA SERÁ DE 154,MCA CON 67 L/S		
Producto	Cantidad	Total
BASE PARA MOTOBOMBA CENTRIFUGA WELLFORD N°10	1,0 C/U	
MACHON DE ACOPLAMIENTO REXNORD E50	1,0 C/U	
BOMBA CENTRIFUGA WELLFORD MODELO WISO E 125-100-315	1,0 C/U	
MOTOR DE SUPERFICIE WELLFORD 200KW 270HP 2P	1,0 C/U	
Valor Neto		\$ 15.366.750

+ ALTERNATIVA N°2 - BOMBA DE SUPERFICIE MULTIETAPA HORIZONTAL + 67 L/S CON 160MCA		
Producto	Cantidad	Total
BOMBA MULTIETAPA WELLFORD MOD. HMC360-40-4, para 100L/S a H=160mts	1,0 C/U	
MOTOR DE SUPERFICIE WELLFORD 200KW 270HP 4P IE3	1,0 C/U	
BASE PARA MOTOBOMBA CENTRIFUGA WELLFORD N°15	1,0 C/U	
MACHON DE ACOPLAMIENTO REXNORD E70	1,0 C/U	
Valor Neto		\$ 21.910.500

Figura C.4: Cotización de bombas Wellford.



Paula Pinto <paulavalpp@gmail.com>

Solicitud de presupuestos simultánea: [RFQDI6668-51804] - Bombas - de agua.
Lugar de entrega: Santiago, Chile

Merve TUNC <mtunc@masgrup.com>
Para: Paula Pinto <paulavalpp@gmail.com>

10 de diciembre de 2020, 5:39

Dear Paula,

I've selected the attached pump for you.

I assume you need complete pump price with electric motor. Since, this is just for budgeting, I am not sending you a formal offer.

KME 150/4 Pump with 160 KW 1500 rpm IE2 Electric motor (Complete with baseplate & coupling)

Price: 27.320 Euro / pce EXW

Lead time: 8-9 Weeks EXW

Materials: CuSn10 Bronze Casing , Impeller / AISI 316 Shaft / Mechanical Seal

Best Regards,



[El texto citado está oculto]

Uyarı/Notification: Bu e-posta ve ekleri sadece gönderilen adres sahiplerine aittir. Bu mesajın yanlışlıkla tarafınıza ulaşması halinde, lütfen göndericiye derhal bilgi veriniz ve mesajı sisteminizden siliniz. MAS-DAF bu mesajın içeriği ve ekleri ile ilgili olarak hukuksal hiçbir sorumluluk kabul etmez. Gönderen taraf hata veya unutmaldan sorumluluk kabul etmez. The information contained in this e-mail and any files transmitted with it are intended solely for the use of the individual or entity to whom they are addressed. If you received this message in error, please immediately notify the sender and delete it from your system. MAS-DAF does not accept any legal responsibility for the contents and attachments of this message. The sender does not accept liability for any errors or omissions.

<https://mail.google.com/mail/u/0?ik=3c69515b07&view=pt&search=all&permmsgid=msg-f%3A1685679839487684091&simpl=msg-f%3A16856798394...> 1/2

Figura C.5: Cotización de bombas Masdaf.

Carrito

"Válvula de ALIVIO BRONCE 1-20 BAR PROSPERITY ALIVIO/BRONCE-PR" eliminado. [¿Deshacer?](#)

Producto	Precio	Cantidad	Subtotal
Válvula De Mariposa Tipo Wafer 2109-GE - 8"	\$129.893	<input type="text" value="1"/>	\$129.893
Válvula Retención DUOCHECK WAFER FIERRO/INOX PN16 2401-GE - 8"	\$122.905	<input type="text" value="1"/>	\$122.905

[APLICAR CUPÓN](#) [ACTUALIZAR CARRITO](#)

Total de la compra

Subtotal	\$252.798
Envío	<input checked="" type="radio"/> Envío gratuito (Sector Santiago) <input type="radio"/> Envío área metropolitana: \$25.000 <input type="radio"/> Envío Regiones (Por Pagar) Las opciones de envío se actualizarán durante el pago.
Impuestos	\$48.032
Total	\$300.829

[PROCESAR SOLICITUD](#)

Nosotros

Quiénes Somos

Infraestructura

Servicios

232 136 300

ventas@fitvalv.cl

Santa Elena #1347. Santiago.

Servicios

Pagos

Cambios y Devoluciones

Políticas de Despacho

Políticas y Condiciones de Uso

Retiro en tienda

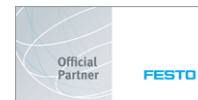
Festo Partner

Recursos

Fichas Técnicas

Video-blog

Blog y Ayuda



eSwi
Heating System - Infrared

Figura C.6: Cotización de válvulas Fitvalv.




+56 223069230 ventas@megacenter.cl Mi cuenta Lista de deseos (0) Carro de compra Pagar

MC MEGACENTER Buscar 12 artículo(s) - \$29.554.773

Detección de Incendio Extinción de Incendio Red Hidráulica Vigilancia de Video Intrusión Control de Acceso Redes Energías Renovables

Carro de compra

Carro de compra

Imagen	Nombre del producto	Modelo	Cantidad	Precio por unidad	Total
	Válvula Eléctrica Reductora de Presión *** Medida Válvula Eléctrica Reductora de Presión: 8" (COD. 181159).	181154	12  	\$2.462.898	\$29.554.773

¿Qué te gustaría hacer después?
Elige si tienes un código de descuento o puntos que quieras usar o para calcular el costo de envío.

Estimación de Envío y Tasas ▾

Sub-Total:	\$24.835.944
IVA (19%):	\$4.718.829
Total:	\$29.554.773

Continuar comprando Pagar

Información
 Información de Entrega
 Políticas de Privacidad
 Términos y Condiciones

Servicio al cliente
 Contáctanos
 ventas@megacenter.cl

Extras
 Marcas
 Ofertas especiales

Mi cuenta
 Mi cuenta
 Historial de pedidos
 Lista de deseos

Figura C.7: Cotización de válvula de alivio en Megacenter.

Cotización

Geosintéticos SpA <ventas@geosinteticos.cl>
Para: Paula Pinto <paulavalpp@gmail.com>

9 de diciembre de 2020, 21:03

Estimada:

Geomembrana HDPE 1.5mm Valor \$2100 el m2 Neto.

Geotextil 300 gr/m2 \$980 el m2 Neto

Atentamente,

Williams Zurita
994783603 - 229858318
www.geosinteticos.cl
ventas@geosinteticos.cl

[El texto citado está oculto]

Figura C.8: Cotización de geomembranas y geotextiles.

RE: CAP Acero - Formulario de Contacto - Consulta producto o servicio

Martin Schneider <mschneider@csh.cl>

15 de diciembre de 2020, 9:13

Para: "paulavalpp@gmail.com" <paulavalpp@gmail.com>

Cc: Henry Mardones <hmardone@csh.cl>, MARIETTE FRANCISCA ESPINOZA ARAGONESE <mfespinoza@csh.cl>

Estimada Paula,

Vendemos caliza en distintas granulometrías.

A modo de referencia, la caliza obtenida directo desde la mina (según ficha adjunta) tiene un precio de mercado del orden de los USD25 por tonelada FOB CAP Acero Talcahuano.

Atentamente,

Martin Schneider R.
Jefe Desarrollo Nuevos Negocios y Propiedades
Compañía Siderúrgica Huachipato

Tel.: +56 (41) 2502174

-----Mensaje original-----

De: MARIETTE FRANCISCA ESPINOZA ARAGONESE

Enviado el: martes, 15 de diciembre de 2020 8:47

Para: Martin Schneider

Asunto: RV: CAP Acero - Formulario de Contacto - Consulta producto o servicio

De: noresponder@csh.cl

Enviados: lunes, 14 de diciembre de 2020 19:04:02 (UTC-04:00) Santiago

Para: Contacto CAP Acero

Asunto: CAP Acero - Formulario de Contacto - Consulta producto o servicio

Los datos recibidos son los siguientes:

nombres = Paula

Figura C.9: Cotización de caliza en Aceros CAP.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos por Venta	0	1,419,942,830	1,495,199,800	1,574,445,390	1,657,890,996	1,745,759,218	1,838,284,457	1,935,713,533
Costo Variable Total		0	0	0	0	0	0	0
Costo Fijo Total								
Depreciación Lineal		-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491
Intereses								
Perdida por venta activo fijo								
Perdida por venta capital de trabajo								
UAI		1,223,780,339	1,299,037,309	1,378,282,899	1,461,728,504	1,549,596,727	1,642,121,966	1,739,551,042
Impuesto		-330,420,692	-350,740,073	-372,136,383	-394,666,696	-418,391,116	-443,372,931	-469,678,781
UDI		893,359,648	948,297,236	1,006,146,516	1,067,061,808	1,131,205,611	1,198,749,035	1,269,872,261
Depreciación Lineal		196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491
Intereses								
Perdida por venta activo fijo								
Perdida por venta capital de trabajo								
FCO		1,089,522,139	1,144,459,727	1,202,309,007	1,263,224,299	1,327,368,102	1,394,911,526	1,466,034,752
Inversión Activo Fijo	-4,299,441,803							
Inversión capital de Trabajo								
Valor Mercado activo fijo								
Valor Mercado capital de Trabajo								
Préstamo								
Amortización préstamo								
FCC	-4,299,441,803	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Caja Privado	-4,299,441,803	1,089,522,139	1,144,459,727	1,202,309,007	1,263,224,299	1,327,368,102	1,394,911,526	1,466,034,752

VAN	12,916,117,590
TIR	28%
r	2.8%

Figura C.10: Flujo de caja parte I.

Año	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingresos por Venta	2,038,306,350	2,146,336,587	2,260,092,426	2,379,877,325	2,506,010,823	2,638,829,396	2,778,687,354	2,925,957,784
Costo Variable Total	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Fijo Total								
Depreciación Lineal	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491
Intereses								
Perdida por venta activo fijo								
Perdida por venta capital de trabajo								
UAI	1,842,143,859	1,950,174,096	2,063,929,935	2,183,714,833	2,309,848,332	2,442,666,905	2,582,524,863	2,729,795,293
Impuesto	-497,378,842	-526,547,006	-557,261,082	-589,603,005	-623,659,050	-659,520,064	-697,281,713	-737,044,729
UDI	1,344,765,017	1,423,627,090	1,506,668,852	1,594,111,828	1,686,189,282	1,783,146,841	1,885,243,150	1,992,750,564
Depreciación Lineal	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491
Intereses								
Perdida por venta activo fijo								
Perdida por venta capital de trabajo								
FCO	1,540,927,508	1,619,789,581	1,702,831,344	1,790,274,320	1,882,351,773	1,979,309,332	2,081,405,641	2,188,913,055
Inversión Activo Fijo			\$ -1,868,776,000					
Inversión capital de Trabajo								
Valor Mercado activo fijo								
Valor Mercado capital de Trabajo								
Préstamo								
Amortización préstamo								
FCC	0	0	-1,868,776,000	0	0	0	0	0
Flujo Caja Privado	1,540,927,508	1,619,789,581	-165,944,656	1,790,274,320	1,882,351,773	1,979,309,332	2,081,405,641	2,188,913,055

Figura C.11: Flujo de caja parte II.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos por Venta	0	1,424,706,782	1,500,216,241	1,579,727,702	1,663,453,270	1,751,616,294	1,844,451,957	1,942,207,911
Costo Variable Total		0	0	0	0	0	0	0
Costo Fijo Total		0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Lineal		-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491
Intereses								
Perdida por venta activo fijo								
Perdida por venta capital de trabajo								
UAI		1,228,544,291	1,304,053,750	1,383,565,211	1,467,290,779	1,555,453,803	1,648,289,466	1,746,045,420
Impuesto		-331,706,959	-352,094,513	-373,562,607	-396,168,510	-419,972,527	-445,038,156	-471,432,263
UDI		896,837,332	951,959,238	1,010,002,604	1,071,122,269	1,135,481,276	1,203,251,310	1,274,613,157
Depreciación Lineal		196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491
Intereses								
Perdida por venta activo fijo								
Perdida por venta capital de trabajo								
FCO		1,092,999,824	1,148,121,729	1,206,165,095	1,267,284,760	1,331,643,767	1,399,413,802	1,470,775,648
Inversión Activo Fijo	-4,299,441,803							
Inversión capital de Trabajo								
Valor Mercado activo fijo								
Valor Mercado capital de Trabajo								
Préstamo								
Amortización préstamo								
FCC	-4,299,441,803	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Caja Privado	-4,299,441,803	1,092,999,824	1,148,121,729	1,206,165,095	1,267,284,760	1,331,643,767	1,399,413,802	1,470,775,648

VAN	12,976,480,870
TIR	28%
r	2.8%

Figura C.12: Flujo de caja con mayor tasa de evaporación, parte I.

Año	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingresos por Venta	2,045,144,930	2,153,537,612	2,267,675,105	2,387,861,886	2,514,418,566	2,647,682,750	2,788,009,935	2,935,774,462
Costo Variable Total	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Fijo Total	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Lineal	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491	-196,162,491
Intereses								
Perdida por venta activo fijo								
Perdida por venta capital de trabajo								
UAI	1,848,982,439	1,957,375,121	2,071,512,614	2,191,699,395	2,318,256,074	2,451,520,258	2,591,847,444	2,739,611,971
Impuesto	-499,225,259	-528,491,283	-559,308,406	-591,758,837	-625,929,140	-661,910,470	-699,798,810	-739,695,232
UDI	1,349,757,181	1,428,883,838	1,512,204,208	1,599,940,558	1,692,326,934	1,789,609,789	1,892,048,634	1,999,916,739
Depreciación Lineal	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491	196,162,491
Intereses								
Perdida por venta activo fijo								
Perdida por venta capital de trabajo								
FCO	1,545,919,672	1,625,046,329	1,708,366,699	1,796,103,049	1,888,489,426	1,985,772,280	2,088,211,125	2,196,079,230
Inversión Activo Fijo			\$ -1,868,776,000					
Inversión capital de Trabajo								
Valor Mercado activo fijo								
Valor Mercado capital de Trabajo								
Préstamo								
Amortización préstamo								
FCC	0	0	-1,868,776,000	0	0	0	0	0
Flujo Caja Privado	1,545,919,672	1,625,046,329	-160,409,301	1,796,103,049	1,888,489,426	1,985,772,280	2,088,211,125	2,196,079,230

Figura C.13: Flujo de caja con mayor tasa de evaporación, parte II.