



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

## **EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DEL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR TÉRMICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA E INGENIERA CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA

CONSTANZA ANGÉLICA GARCÉS CANCINO

PROFESOR GUÍA:  
LEANDRO HERRERA ZEPPELIN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CÉSAR SÁEZ NAVARRETE  
FELIPE DÍAZ ALVARADO  
FRANCISCO GRACIA CAROCA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por KDM Empresas

SANTIAGO DE CHILE  
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniera Civil Química e  
Ingeniera Civil en Biotecnología  
POR: Constanza Garcés Cancino  
FECHA: diciembre de 2016  
PROFESOR GUÍA: Leandro Herrera Zeppelin

## **EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DEL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR TÉRMICA**

Los mayores niveles de desarrollo y el crecimiento de la población mundial han traído consigo una serie de efectos perjudiciales para el medio ambiente; esto por medio del uso intensivo de los recursos naturales, así como también del aumento de las emisiones contaminantes y de la generación de residuos. Estos últimos, a pesar de las distintas políticas en las que trabajan los países para reducir su impacto al medio ambiente y aprovechar de mejor manera el valor de los materiales contenidos en ellos, son dispuestos —en su mayoría— en un relleno sanitario, instalación cuya operación tiene asociada la generación de corrientes altamente contaminantes. Las corrientes líquidas se conocen como lixiviados y se caracterizan, de manera genérica, por su alto contenido de materia orgánica, metales pesados, sales minerales, entre otros.

Este trabajo de memoria tiene como objetivo evaluar la sustentabilidad de un sistema de secado de lixiviados, utilizando energía solar térmica. Como caso de estudio se consideró el Relleno Sanitario Loma Los Colorados de KDM Empresas. La alternativa propuesta consta de un campo de colectores solares cilindro parabólicos que captan la radiación solar y la transfieren al lixiviado por medio de un fluido térmico, en un intercambiador de calor de doble tubo. Así, el lixiviado es precalentado antes de ingresar a un destilador solar de tipo bandeja, donde se evapora y condensa parte del contenido de agua; obteniendo un residuo sólido o semi-sólido, cuyo manejo resulta más fácil y seguro, y una corriente líquida con baja carga contaminante.

Se dimensionó el sistema tomando como caso base un flujo de efluente a tratar igual a 120 [m<sup>3</sup>/día]. En base a esto y a las condiciones de operación que fueron definidas, se obtuvo un área de apertura del campo solar igual a 688 [m<sup>2</sup>]. El área del intercambiador de calor resultó en 19 [m<sup>2</sup>] con un largo de 118 [m]. Para el destilador se obtuvo un área de bandeja igual a 4.470 [m<sup>2</sup>] y una producción diaria de destilado igual a 27,7 [m<sup>3</sup>/día]. Los costos de inversión del proyecto fueron estimados en 344.000 [\$USD]; un 64% del total corresponde al campo solar. Por su parte, los costos de operación fueron estimados en 64.600 [\$USD/año]. Como beneficios económicos se consideraron ahorros de costos asociados a la recirculación del efluente y a la compra de agua potable para riego, los que fueron estimados en 64.300 [\$USD/año].

Desde el punto de vista ambiental, se identificaron potenciales impactos positivos y negativos asociados al sistema propuesto. Los potenciales impactos positivos superan a los negativos, por lo que la alternativa que se propone sería capaz de entregar un beneficio ambiental sostenido. A partir de la evaluación realizada, se concluye que, desde el punto de vista económico, el proyecto no es conveniente en estos momentos, sin embargo, es factible desde el punto de vista técnico y ambiental, por lo que se recomienda continuar con una evaluación más detallada.

*A.J.R. Garcés*

*Por la constancia y valor que mostraste toda tu vida  
y que nos dejaste como una de las mejores enseñanzas...*

## Agradecimientos

A los profesores Leandro y César, por la oportunidad de trabajar con ustedes en este proyecto de finalización de carrera. Por ser guías y por su tiempo. Por su comprensión y cariño.

A KDM Tratamiento, por permitirme desarrollar la memoria con ustedes y poder hacer de esta propuesta una más realista e interesante. Por supuesto que también a las personas de la empresa que me acogieron y que colaboraron con gran disposición en este proyecto.

A mis papás, por su apoyo incondicional y preocupación. Por confiar en mí siempre y por enseñarme de esfuerzo y compromiso. A mi papá que desde algún lugar nos cuida y nos inspira su fuerza cada día. A mi mamá y mi hermano, Angélica y Pedro, por la tremenda fortaleza que han mostrado en el último tiempo y que me permitió seguir adelante en los momentos más difíciles.

A las personas que me acompañaron en mi paso por la Universidad. A los amigos y compañeros de Plan Común que me acogieron durante los primeros semestres, dándome su cariño y ayuda sincera, y que sin vernos por un buen tiempo a veces, el reencuentro siempre es motivo de alegría. Asimismo, a las tremendas personas que aparecieron un poco más tarde, mis IQBTs. Porque fuimos como un curso, porque compartimos infinitas risas y anécdotas, y porque hicieron mucho más llevaderos esos momentos de estrés antes de cada control, informe o tarea, esperando con nervios que sean las 23:59. De manera especial, agradezco a mi grupo de Taller, *Trisus*. Pancho, Nacho y Juan, gracias por enseñarme a trabajar en equipo y por todo el valor entregado. Por su apoyo siempre y por ser grandes amigos.

A Francisco, mi gran compañero y amigo. Por tu generosidad y cariño infinito. Por tu preocupación y por acompañarme en los momentos más complicados, así como también por hacer de muchos los mejores. Por tu paciencia y comprensión cuando parecía que este trabajo no daba cabida a nada más.

A mis amigos de la vida. A Tamara, Maca y María Paz que la distancia nos separa casi siempre, pero que, así y todo, nos tenemos. Y a Daniel, nuestro angelito que nos cuida.

A quienes fueron parte de mi formación y que de manera desinteresada compartieron sus enseñanzas y conocimientos. Y a todos quienes día a día me hacen crecer como persona y que a veces con pequeños detalles alegran mi vida.

# Tabla de contenido

Índice de tablas .....	vi
Índice de figuras .....	vii
1 Introducción .....	1
1.1 Antecedentes generales .....	1
1.2 Descripción del trabajo y Justificación.....	5
1.3 Objetivos .....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Alcances.....	6
2 Marco teórico.....	7
2.1 Radiación térmica.....	7
2.2 Radiación solar .....	7
2.3 Colectores solares.....	10
2.3.1 Colectores estacionarios.....	10
2.3.2 Colectores concentradores con sistema de seguimiento del sol .....	12
2.4 Aplicaciones de la energía solar en procesos evaporativos .....	15
2.4.1 Desalinización solar.....	16
3 Caso de estudio.....	21
3.1 Sistema actual de tratamiento de lixiviados.....	22
4 Sistema propuesto.....	25
5 Dimensionamiento del sistema.....	28
5.1 Caso base.....	28
5.2 Propiedades de los fluidos .....	28
5.3 Campo solar .....	30
5.3.1 Entradas del modelo .....	30
5.4 Intercambiador de calor .....	36
5.4.1 Coeficiente global de transferencia de calor.....	38
5.4.2 Dimensiones del intercambiador.....	38
5.5 Destilador solar .....	39
6 Evaluación económica .....	44

6.1	Costos de inversión.....	44
6.1.1	Campo solar .....	44
6.1.2	Intercambiador de calor .....	45
6.1.3	Destilador .....	46
6.2	Costos de operación.....	47
6.3	Beneficios.....	47
7	Evaluación ambiental.....	49
8	Discusión.....	52
9	Conclusiones y recomendaciones .....	60
10	Bibliografía .....	62
11	Anexos .....	68
11.1	Anexo A. Características del lixiviado.....	68
11.2	Anexo B. Datos balance caso base.....	69
11.3	Anexo C. Correlaciones para cálculo de propiedades termofísicas .....	70
11.4	Anexo D. Entradas SAM.....	71
	D.1 Variables de entrada SAM .....	71
	D.2 Descripción del formato SAM CSV.....	73
11.5	Anexo E. Dimensionamiento intercambiador de calor.....	74
11.6	Anexo F. Correlaciones usadas en cálculos balances de energía.....	79
11.7	Anexo G. Estimación de costos .....	80
	G.1. Estimación costos de inversión campo solar .....	80
	G.2. Estimación costos de inversión intercambiador de calor.....	80
	G.3. Estimación costos de inversión destilador .....	82
	G.4. Estimación costos de operación .....	83
11.8	Anexo H. Flujo de caja.....	84

## Índice de tablas

Tabla 5.1. Flujos involucrados en la definición del caso base.....	28
Tabla 5.2. Propiedades del lixiviado.....	29
Tabla 5.3. Propiedades del fluido térmico Xceltherm®600.....	29
Tabla 5.4. Coordenadas RSLLC.....	31
Tabla 5.5. Especificaciones técnicas colector Soponova®.....	33
Tabla 5.6. Variables en el punto de diseño.....	34
Tabla 5.7. Resultados dimensionamiento campo solar.....	34
Tabla 5.8. Especificaciones técnicas intercambiador de calor SACOME TF20®.....	36
Tabla 5.9. Resultados coeficientes de transferencia de calor.....	38
Tabla 5.10. Dimensiones del intercambiador de calor.....	39
Tabla 5.11. Parámetros utilizados en los cálculos.....	42
Tabla 5.12. Resultados dimensionamiento destilador.....	43
Tabla 6.1. Costos de inversión campo solar.....	45
Tabla 6.2. Factores para estimar los costos de inversión.....	46
Tabla 6.3. Costo de inversión destilador solar.....	46
Tabla 6.4. Ahorros de costos asociados a la alternativa propuesta.....	48
Tabla 11.1. Valores promedio año 2015 de parámetros medidos en laboratorio interno, correspondientes al muestreo en sumidero y a la salida de los sedimentadores.....	68
Tabla 11.2. Generación de lixiviados, balance hídrico año 2015.....	69
Tabla 11.3. Efluente planta de tratamiento de lixiviados, balance hídrico año 2015.....	69
Tabla 11.4. Detalle entradas SAM.....	71
Tabla 11.5. Costos incluidos en las distintas categorías de costos de inversión del campo solar.....	80
Tabla 11.6. Detalle de los costos de inversión del intercambiador de calor.....	81
Tabla 11.7. Costo de inversión destilador solar.....	82
Tabla 11.8. Estimación costos de operación.....	83
Tabla 11.9. Flujo de caja del proyecto con financiamiento.....	85
Tabla 11.10. Flujos asociados al financiamiento.....	86
Tabla 11.11. Flujos asociados a depreciaciones, valor residual y ganancia y/o pérdida de capital.....	86

## Índice de figuras

Figura 1.1. Diagrama con los elementos para el balance de masa de agua.....	3
Figura 1.2. Distribución de la capacidad instalada SIC-SING a marzo de 2016 .....	4
Figura 1.3. Mapa mundial de la Irradiación Global Horizontal (GHI).....	5
Figura 2.1. Ángulos para una superficie inclinada y vista plana del ángulo azimut del sol. ....	9
Figura 2.2. Colectores solares estacionarios. A. Placa plana, B. Tubos evacuados, C. Parabólico compuesto, D. Tanque solar con gradiente salino .....	12
Figura 2.3. Colectores concentradores. A. Cilindro parabólico, B. Disco parabólico, C. Reflector Fresnel lineal, D.Campo heliostático .....	15
Figura 2.4. Esquema de un destilador solar de bandeja de un efecto.....	16
Figura 2.5. Destilador solar acoplado a un destilador externo.....	20
Figura 2.6. Sistema de destilación solar acoplado a un colector cilindro parabólico.....	20
Figura 3.1. Vista aérea del RSLLC. ....	21
Figura 3.2. Diagrama sistema de tratamiento actual.....	23
Figura 4.1. Diagrama del sistema de tratamiento propuesto.....	26
Figura 5.1. Colector Soponova®.....	32
Figura 5.2. Potencia térmica generada por el campo solar.....	35
Figura 5.3. Comparación entre potencia térmica incidente, absorbida y producida.....	35
Figura 5.4. Intercambiador de calor SACOME TF20® .....	36
Figura 5.5. Principales mecanismos de transferencia de energía en el destilador.....	39
Figura 6.1. Distribución de costos de inversión.....	47
Figura 11.1. Toma de muestra a la salida de un sedimentador.....	68

# 1 Introducción

## 1.1 Antecedentes generales

Los mayores niveles de desarrollo económico de los países y el crecimiento de la población mundial y de la producción industrial han traído consigo un aumento en la generación de residuos y emisiones contaminantes. Asimismo, la constante búsqueda de bienestar por parte de la humanidad ha llevado a un intensivo uso de los recursos naturales, incluso más allá de su capacidad de regeneración, resultando en su agotamiento y afectando negativamente su equilibrio natural. Un estudio que comparó la demanda de recursos naturales en relación a la productividad biológica del planeta, desde el año 1961, mostró evidencia de que las actividades humanas han excedido la capacidad regenerativa de la biósfera desde los años ochenta [1].

Considerando lo anterior, hoy día resulta clave desacoplar la tendencia del consumo de recursos naturales de la del nivel de desarrollo y bienestar. Los países enfrentan el desafío de basar su actividad en la sustentabilidad, la que se fundamenta en el siguiente principio: “todo lo que necesitamos para nuestra supervivencia y bienestar depende, directa o indirectamente, de nuestro ambiente natural. Perseguir la sustentabilidad es crear y mantener las condiciones bajo las cuales los humanos y la naturaleza pueden existir en armonía productiva y soportar las generaciones presentes y futuras” [2].

La generación de residuos se asocia —de forma inherente— con la actividad del hombre, produciendo un impacto negativo en el medio ambiente y poniendo en riesgo esta coexistencia armoniosa con la naturaleza. De acuerdo a la definición entregada por el Ministerio del Medio Ambiente en el documento “Informe del Estado del Medio Ambiente 2011”, los residuos son sustancias u objetos que habiendo llegado al final de su vida útil se desechan, procediendo a tratarlos mediante valorización o eliminación [3].

Los residuos sólidos, en particular, se clasifican —de acuerdo a la estructura principal de información disponible en el país y a su origen— en residuos sólidos industriales y residuos sólidos municipales. Los primeros provienen de los siguientes sectores: agricultura y silvicultura, explotación de minas y canteras, industria manufacturera, producción de energía, distribución y purificación de agua y construcción; todos pertenecientes a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas. Por su parte, los residuos sólidos municipales corresponden a los domiciliarios, provenientes de los hogares; los asimilables a domiciliarios, provenientes del comercio, oficinas y entidades como escuelas y edificios públicos; y, finalmente, los generados de servicios municipales como podas, limpieza de calles, entre otras [4].

Se estima que la generación de residuos sólidos en Chile el año 2009 fue de 16,9 millones de toneladas, de las cuales 6,5 millones correspondieron a residuos municipales y los 10,4 millones restantes a residuos industriales, experimentando un crecimiento estimado del 42% en el período comprendido entre los años 2000 y 2009 [4].

Hacia el año 1995, la totalidad de los residuos sólidos domiciliarios generados en Chile eran dispuestos en vertederos y basurales, sin ningún tipo de control o sin las medidas sanitarias

mínimas establecidas por el D.S N°189/05 [5]. Actualmente, existe una Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos, del Ministerio del Medio Ambiente, que orienta la implementación de una estrategia jerarquizada. Esta estrategia promueve la prevención de su generación y, si esto no es posible, se fomenta, en este orden, su reutilización, reciclaje, valorización energética, tratamiento y disposición final. Lo anterior apunta a un mayor aprovechamiento de los bienes desechados, así como a una disminución del impacto al medio ambiente y la salud humana [4].

A pesar de los esfuerzos que se están haciendo, el proceso más ampliamente utilizado para el manejo de residuos sólidos en Chile es la disposición final en rellenos sanitarios. Si bien más de un 50% del total de residuos sólidos municipales generados en el país podrían ser valorizados, este tipo de iniciativas es aún incipiente [3,4].

De acuerdo al D.S. N°189/05, un relleno sanitario corresponde a una instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables; diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medio ambiente; en la cual las basuras son compactadas en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente, cumpliendo con las disposiciones de la normativa vigente [6].

La construcción de un relleno sanitario contempla, además de la modificación del drenaje existente y la excavación, la instalación de un sistema de captación de las corrientes líquidas y de un sistema de impermeabilización basal. Éste consiste en una serie de capas de distintos materiales (arcilla, geomembrana, geotextil, grava, entre otros) que proporcionan contención de contaminantes y evitan la migración del lixiviado y del gas. Terminada la etapa de construcción, comienza la explotación. Los residuos son vertidos en forma contigua hasta completar una celda; se esparcen en capas de 45-60 [cm] y se compactan. Al final de cada día se cubren todas las superficies externas del relleno con una delgada capa de material que normalmente es extraído de la misma excavación; esto con el fin de controlar el vuelo de materiales, prevenir la entrada o salida de vectores y controlar la entrada de agua [7,8].

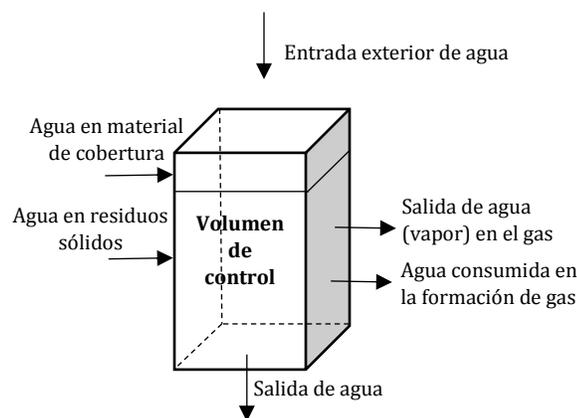
Una celda es la unidad básica de construcción del relleno, constituida por los residuos depositados durante un período de explotación (usualmente, un día) y el material de cubrición. El conjunto horizontal de celdas que cubre la superficie global del relleno se denomina nivel. Una vez completado el primero, se continúa con otro superior y así, sucesivamente, hasta completar el número de niveles de diseño, momento en el cual se procede a la clausura. A medida que se va completando cada nivel se van disponiendo las conducciones de recolección del gas, ya sea a través de zanjas horizontales que se rellenan con grava o mediante pozos verticales que se van prolongando longitudinalmente conforme aumenta la altura del relleno [7,8].

Los rellenos sanitarios son sistemas complejos en los que se llevan a cabo numerosos procesos biológicos, químicos y físicos. Dentro de las reacciones biológicas se debe señalar, especialmente, la degradación de la materia orgánica, produciendo gases y, eventualmente, líquidos. Esta reacción se lleva a cabo en condiciones aerobias hasta que se agota el oxígeno presente inicialmente, siendo el dióxido de carbono,  $CO_2$ , el principal producto. Tras este período y de forma gradual, se van desarrollando condiciones anaerobias, con la consecuente generación de

metano ( $CH_4$ ),  $CO_2$ , y trazas de amoníaco ( $NH_3$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ); esta mezcla de gases es conocida como biogás. Las emisiones gaseosas constituyen una importante fuente de contaminación ambiental, así como un factor de riesgo para la propia seguridad de la instalación, por lo que su adecuada gestión implica la previa desgasificación del relleno sanitario y el posterior tratamiento del biogás [7,8,9].

Por otro lado, a causa del agua que se infiltra a través de la masa de residuos y la contenida originalmente en estos, se produce un proceso de lixiviación de materiales biológicos y químicos, generando corrientes líquidas que contienen una gran variedad de compuestos, cuyas concentraciones varían de acuerdo a la composición de los residuos y a la edad del relleno sanitario. No obstante, estas corrientes se caracterizan genéricamente por su alto contenido de materia orgánica, metales pesados, sales minerales, entre otros [8].

El potencial de generación de lixiviado puede determinarse mediante un balance de masa que considera todas las corrientes de agua que entran al relleno, así como el volumen de agua consumido en las reacciones químicas y aquel que sale del sistema por evaporación. Asimismo, es necesario conocer la capacidad de campo, esto es, el volumen de agua que puede retener una masa de residuos. En la Figura 1.1 se muestra un diagrama con las corrientes involucradas en el balance.

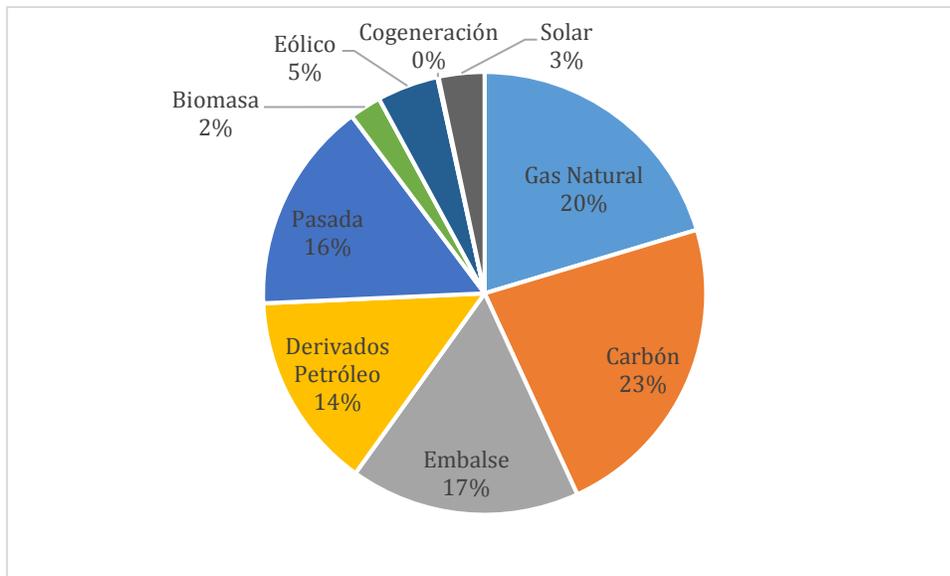


**Figura 1.1.** Diagrama con los elementos para el balance de masa de agua (adaptada de [8]).

La gestión de lixiviados es clave para la eliminación de la potencial contaminación de aguas subterráneas. Dada la naturaleza compleja de estas corrientes, no existe un tratamiento único capaz de cumplir con las exigencias de descarga estipuladas por norma; por esto, siempre es necesaria una combinación de procesos. De forma genérica, los métodos de tratamiento se clasifican en los siguientes grupos: recirculación al vertedero, tratamiento combinado con aguas residuales urbanas, evaporación, tratamiento biológico y tratamientos físico-químicos [7].

Cualquier proceso de tratamiento requiere energía, recurso necesario para la actividad humana y condicionante del desarrollo económico. La demanda mundial de energía ha experimentado un crecimiento constante, concentrándose poco a poco en las economías emergentes. Asimismo, ha aumentado también el consumo de combustibles fósiles, cuya combustión libera al ambiente gases de efecto invernadero, principales causantes del calentamiento global [10].

Chile importa más del 60% de su energía primaria, estando permanentemente en una situación de dependencia e incertidumbre ante la inestabilidad y volatilidad de los precios en los mercados internacionales y las restricciones de abastecimiento que se produzcan por fenómenos políticos, climáticos o de mercado. Por otro lado, su matriz de generación eléctrica es principalmente térmica y los precios de la electricidad han experimentado un aumento considerable en la última década [11]. En la Figura 1.2 se muestra la distribución de la capacidad instalada en el SIC y SING al mes de marzo de 2016. Ambos sistemas representan más del 99% de la capacidad instalada nacional, con 20.275 [MW].

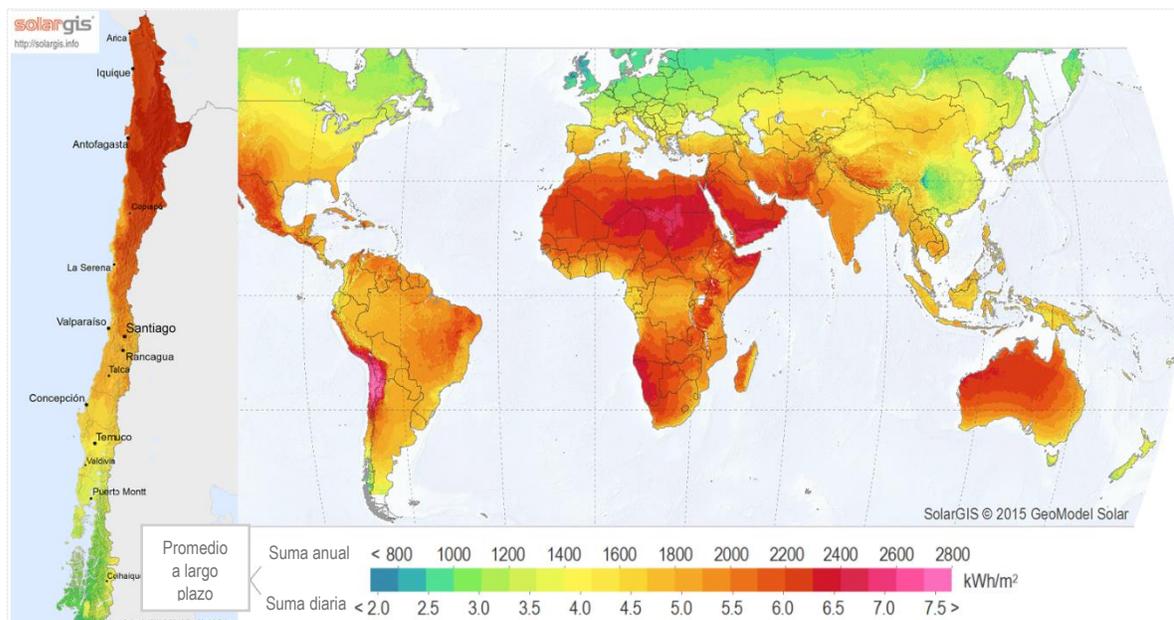


**Figura 1.2.** Distribución de la capacidad instalada SIC-SING a marzo de 2016 [12].

Lo anterior, motiva la búsqueda de fuentes alternativas de energía que no tan solo sean confiables, sino también renovables y con un mínimo impacto al medio ambiente. Las energías renovables no convencionales (ERNC) aparecen hoy como una opción sustentable y son uno de los ejes de la Estrategia Nacional de Energía 2012-2030. Este tipo de energías se caracterizan porque no se consumen ni se agotan en una escala humana durante su transformación y uso, y cuyas tecnologías para su aprovechamiento aún están en desarrollo [13].

A abril del año 2016 la capacidad instalada ERNC en Chile asciende a 2.516 [MW]. El primer y segundo lugar lo ocupan los parques solares fotovoltaicos y parques eólicos, con 1.113 [MW] y 947 [MW] instalados, respectivamente, seguidos por la biomasa y mini hidro. Cabe destacar que estos valores consideran también aquellos proyectos que se encuentran interconectados en fase de prueba [14].

Chile presenta condiciones únicas en términos de potencial de energía solar. De acuerdo a varios estudios, y como se puede ver en la Figura 1.3, el norte de Chile es una de las pocas regiones en el mundo con valores de una irradiancia global anual que exceden los 2.500 [kWh/m<sup>2</sup>], sobrepasando incluso los 3.000 [kWh/m<sup>2</sup>] en algunas zonas. Esto justifica el gran crecimiento que ha experimentado esta ERNC a nivel nacional en los últimos años [15].



**Figura 1.3.** Mapa mundial de la Irradiación Global Horizontal (GHI) [16].

## 1.2 Descripción del trabajo y Justificación

Inherente a la actividad del hombre se tiene la generación de residuos, proceso que ha experimentado un crecimiento sostenido a lo largo de los años, junto con el aumento de la población mundial y los mayores niveles de desarrollo alcanzados por la sociedad.

A pesar de las distintas políticas en las que trabajan actualmente los países para reducir el impacto al medio ambiente y aprovechar de mejor manera el valor de los materiales que componen los residuos, la mayor parte de estos es dispuesta en un relleno sanitario. En él ocurren diversos procesos biológicos, químicos y físicos que llevan a la generación de corrientes líquidas y gaseosas, las que constituyen un importante riesgo para la salud y el medio ambiente. Es por esto que su adecuada gestión es una actividad fundamental en cualquier relleno sanitario; además, hoy en día se hace necesaria la búsqueda de alternativas de tratamiento más sustentables.

En el presente trabajo de memoria se propone un sistema de secado de lixiviados de un relleno sanitario, acoplado a un sistema de concentración solar que pueda entregar la energía requerida para extraer parte del contenido de agua presente en estas corrientes y generar un residuo sólido o semi-sólido, altamente concentrado. Esto permite la disposición segura y en menor volumen del residuo final y la obtención de una corriente líquida con una composición de elementos contaminantes considerablemente menor, la que incluso podría resultar ser apta para uso en riego. Contempla, además, la utilización de una fuente de energía limpia y renovable.

Se evalúa el sistema propuesto desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, y como caso particular de estudio se considera el relleno sanitario Loma Los Colorados, ubicado en la comuna de Til Til, Región Metropolitana, perteneciente a KDM Empresas.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo de memoria de título consiste en evaluar la sustentabilidad de un sistema de secado de lixiviados de un relleno sanitario utilizando energía solar térmica.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar un caso de estudio y analizar alternativas de secado.
- Estudiar y comparar distintos sistemas de concentración solar para definir el más sustentable y/o con mayores ventajas comparativas.
- Seleccionar el sistema de secado y de captación de la energía solar.
- Proponer bases de diseño para el caso seleccionado.
- Evaluar la sustentabilidad del proceso resultante.

## **1.4 Alcances**

Dentro de los alcances de este trabajo se espera contribuir con una propuesta de tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario y, en particular, para el caso del relleno sanitario Loma Los Colorados de KDM Empresas. Esta propuesta contempla el diseño de un sistema de secado que utilice energía solar térmica, con el respectivo dimensionamiento de los equipos involucrados y una evaluación en los ámbitos técnico, económico y ambiental a nivel de ingeniería conceptual.

La alternativa propuesta busca la obtención de un residuo final sólido o semi-sólido que retenga los principales contaminantes que componen el lixiviado y una corriente líquida con el agua extraída que podría tener una composición que cumpla con los requisitos de calidad para uso en riego. No se evalúa la obtención de agua potable.

Los resultados obtenidos podrían utilizarse como base para la decisión por parte de la empresa para la futura realización de un proyecto piloto y estudios con mayor nivel de detalle, en el marco de su plan de innovación, sistematizado bajo la norma europea UNE 166002.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Radiación térmica

La radiación puede considerarse como energía que fluye a través del espacio con la velocidad de la luz y puede originarse de varias formas. Algunas sustancias emiten radiación cuando son tratadas por agentes externos, sin embargo, existe un tipo de radiación que resulta exclusivamente de la temperatura —la radiación térmica— emitida por todas las sustancias a temperaturas superiores al cero absoluto [17].

La radiación se mueve a través del espacio siguiendo líneas rectas y solo puede ser interceptada por las sustancias a la vista del cuerpo radiante. La fracción reflejada de la radiación que incide sobre un cuerpo se denomina reflectividad ( $\rho$ ), absorbanza ( $\alpha$ ) la fracción absorbida y transmisividad ( $\tau$ ) la fracción transmitida. La suma de estas razones es igual a uno [17].

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.1)$$

Un cuerpo que absorbe toda la radiación incidente sobre él recibe el nombre de cuerpo negro y presenta un valor de absorbanza igual a la unidad. Una relación básica para la radiación de cuerpo negro es la ley de *Stefan-Boltzmann*, según la cual el poder emisor total de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta

$$W_b = \sigma \cdot T^4 \quad (2.2)$$

donde  $\sigma$  corresponde a la constante de *Stefan-Boltzmann* y tiene un valor igual a  $5,670 \cdot 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>)] [17].

Un cuerpo negro posee el máximo poder emisor alcanzable para cualquier temperatura dada. La relación entre el poder emisor total ( $W$ ) de un cuerpo y el de un cuerpo negro a la misma temperatura se define como la emisividad ( $\varepsilon$ ) [17]

$$\varepsilon = \frac{W}{W_b} \quad (2.3)$$

### 2.2 Radiación solar

La radiación solar es el resultado de procesos que tienen lugar en la superficie del sol a una temperatura equivalente de cuerpo negro, visto desde la Tierra, de 5.777 [K].

Dada la geometría del sol respecto a la Tierra, la radiación que éste emite y que es recibida en el exterior de la atmósfera terrestre resulta en una intensidad prácticamente fija. La constante solar ( $G_s$ ) es la energía emitida por el sol, por unidad de tiempo, recibida en una unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a la distancia promedio sol-Tierra, fuera de la atmósfera [18].

La constante solar tiene un valor de 1.353 [W/m<sup>2</sup>], sin embargo, cerca de un 30% de la radiación que incide sobre la Tierra es reflejada al espacio por las nubes, aerosoles atmosféricos, nieve, arena de desierto, etc. Del 70% restante, una porción es absorbida por las distintas capas de la

atmósfera, según las diferentes longitudes de onda. Luego, solo entre un 45% y 50% de la radiación solar total atraviesa la atmósfera y es tomada por la superficie terrestre y océanos [19].

La atmósfera modifica las características de la radiación incidente, por lo que la fracción que es recibida en la superficie de la Tierra se expresa como la suma de dos componentes [18]:

- **Radiación directa:** corresponde a la radiación solar que llega a la superficie terrestre sin cambios en su dirección.
- **Radiación difusa:** radiación recibida en la superficie terrestre luego de que su dirección haya sido modificada por dispersión en la atmósfera.

Además, se denomina radiación normal incidente a aquella que es recibida en una superficie perpendicular a los rayos provenientes del sol. Para recibir la radiación normal durante todo el día es necesario que la superficie receptora se mueva de este a oeste siguiendo la posición del sol. Por otro lado, si ésta está en posición horizontal, es decir, perpendicular al radio de la Tierra, se habla de radiación horizontal. Como es más sencillo recolectar la energía solar en una superficie que no se mueva a lo largo del día, se busca un ángulo de inclinación tal que se maximice la radiación recibida durante el día y/o año; a esto se le denomina radiación incidente en un plano inclinado.

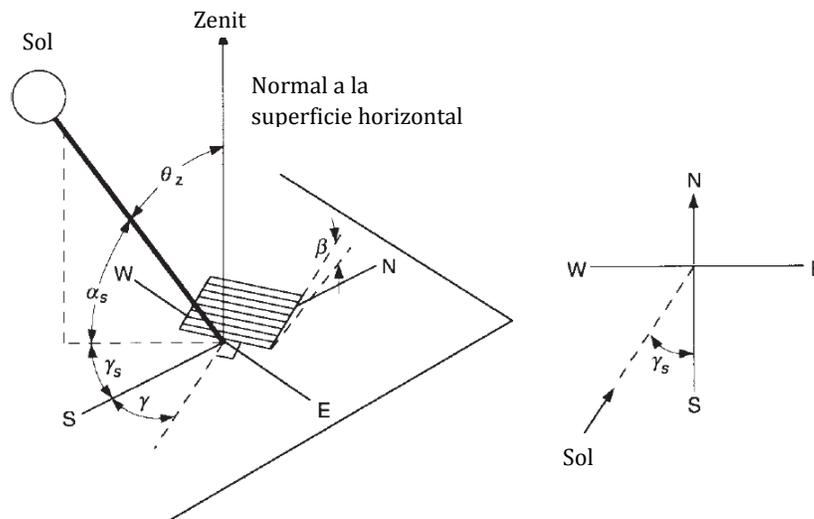
La radiación solar que incide sobre la atmósfera también varía debido a la órbita elíptica de la Tierra alrededor del sol. Además, el eje de la Tierra tiene una inclinación de  $23,5^\circ$  con respecto a su plano de traslación que resulta en las cuatro estaciones. Por lo tanto, el movimiento del sol que se observa desde un punto fijo de la Tierra es variable a lo largo del año, dependiendo de la latitud en que uno se localice. Esto lleva a cambios estacionales en la radiación que incide sobre la superficie.

La posición del sol relativa a una localización dada puede ser representada en términos de varios ángulos descritos a continuación [18]. En la Figura 2.1 se muestran algunos de ellos.

- **Latitud,  $\varphi$ :** localización angular norte-sur del ecuador. Toma valores positivos en el hemisferio norte y negativos en el hemisferio sur.  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ .
- **Declinación,  $\delta$ :** posición angular del sol cuando está en el meridiano local con respecto al plano del ecuador.  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ .
- **Inclinación,  $\beta$ :** ángulo entre el plano de la superficie y la horizontal.  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .
- **Ángulo horario,  $\omega$ :** desplazamiento angular del sol respecto del meridiano local, debido a la rotación de la Tierra en su eje a  $15^\circ$  por hora. Toma valores negativos para la mañana y positivos para la tarde.
- **Azimut,  $\gamma$ :** desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie con respecto al meridiano local. Este ángulo es cero cuando la proyección apunta hacia el norte, positivo cuando apunta hacia el oeste y negativo cuando apunta al este.  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .
- **Ángulo de incidencia,  $\theta$ :** ángulo entre el haz de radiación directa en una superficie y la normal a la misma.

Además, se definen otros ángulos que describen la posición del sol en el cielo:

- **Ángulo zenit,  $\theta_z$ :** ángulo entre la vertical y la línea al sol, esto es, el ángulo de incidencia de la radiación directa en una superficie horizontal.
- **Ángulo de altitud solar,  $\alpha_s$ :** ángulo entre la horizontal y la línea al sol, esto es, el complemento del ángulo zenit.
- **Ángulo de azimut del sol,  $\gamma_s$ :** desplazamiento angular respecto al sur de la proyección de la radiación directa en el plano horizontal. Toma valores positivos hacia el oeste y negativos hacia el este.



**Figura 2.1.** Ángulos para una superficie inclinada y vista plana del ángulo azimut del sol [18].

La Tierra recibe energía solar de manera abundante, no obstante, su disponibilidad presenta grandes variaciones temporales y espaciales, por tanto, el diseño de cualquier proceso que utilice esta fuente de energía requiere conocer la distribución de este recurso a un gran nivel de detalle espacial y temporal. La radiación solar incidente puede ser cuantificada a partir de modelos que involucran estos ángulos, así como también a través de instrumentos que miden la radiación en la superficie terrestre y de mediciones satelitales.

La energía solar es el recurso energético más abundante sobre el planeta y ha sido aprovechada para la vida desde tiempos inmemorables. Puede ser utilizada en forma directa como iluminación, o bien para otros fines, previa conversión en otra forma de energía. Las plantas y otros organismos, mediante la fotosíntesis, transforman la energía solar en energía química de compuestos orgánicos; esta es la conversión biológica. Otro método es la conversión directa en energía eléctrica, mediante el uso de celdas fotovoltaicas, las que tienen uno o más campos eléctricos que actúan para forzar a los electrones liberados por la acción de la luz para fluir en una cierta dirección, generando una corriente continua. Finalmente, se tiene la conversión térmica que, de manera natural, subyace tras el ciclo hidrológico y ciclo de los vientos. Éste es el método más sencillo que existe, sin embargo, con tecnología se puede aumentar

considerablemente su eficacia y, además, lograr temperaturas de trabajo muy elevadas; permitiendo calentar agua y otros medios para aplicaciones industriales.

## 2.3 Colectores solares

Los colectores de energía solar pueden ser considerados como un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la energía de la radiación solar en energía interna de un medio calotransportador. Así, este dispositivo absorbe la radiación solar incidente y la transforma en calor, el cual es transferido a un fluido —usualmente agua, aire o aceite— que aumenta su temperatura a medida que circula por el colector. La energía solar así colectada es usada directamente para calentar otro medio o es llevada a un tanque de almacenamiento térmico para su uso en la noche o en días nublados [20,21].

Los colectores solares pueden ser estáticos o tener un sistema de seguimiento del sol en uno o dos ejes. Asimismo, de acuerdo a su razón de concentración ( $C$ ) —definida como la razón entre el área de apertura ( $A_a$ ) y el área del receptor ( $A_r$ )— pueden ser clasificados en dos categorías: no concentradores y concentradores. Un colector solar no concentrador tiene la misma área de intercepción y de absorción de la radiación solar, mientras que los concentradores con sistema de seguimiento del sol, usualmente, tienen una superficie reflectora cóncava para interceptar y enfocar la radiación solar a una superficie receptora más pequeña, aumentando así, el flux de radiación [20,22].

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.4)$$

### 2.3.1 Colectores estacionarios

Este tipo de colector se mantiene de manera permanente en una posición fija. Cuatro tipos de colectores caen en esta categoría, los cuales se describen a continuación.

#### 2.3.1.1 Colector de placa plana

En la Figura 2.2 A se puede apreciar un colector de placa plana típico. Éste consta de una cubierta de vidrio o de plástico, placas absorbentes, tubos a través de los cuales circula el fluido de transferencia de calor, un sistema de aislamiento y un marco o contenedor [20].

Cuando la radiación solar pasa a través de una cubierta transparente e incide en la superficie absorbente, usualmente de color negro, una fracción importante de esta energía es absorbida por la placa y transferida al fluido térmico en los tubos por donde éste circula, para ser almacenada o usada directamente.

La parte inferior de la placa absorbente y los costados del contenedor están aislados para reducir pérdidas de calor por conducción. Por su parte, la cubierta transparente está hecha de una o múltiples capas de vidrio u otro material con una alta transmisividad de la radiación de onda corta y una baja transmisividad para la radiación térmica de onda larga emitida por la placa. Así, no solo reduce las pérdidas de calor por convección, sino que también reduce las pérdidas por radiación, debido al efecto invernadero que se produce [20,21].

Comúnmente, este tipo de colector se emplea para aplicaciones de baja temperatura, hasta alrededor de 100 [°C], aunque algunos emplean aislamiento al vacío o aislamiento transparente, pudiendo alcanzar temperaturas ligeramente mayores.

#### **2.3.1.2 Colector de tubos evacuados**

En este tipo de colector el receptor se encuentra dentro de una cubierta tubular de vidrio sellada al vacío, lo que minimiza las pérdidas de calor por convección y conducción, de modo que estos colectores pueden operar a temperaturas más altas que los de placa plana y la eficiencia tiende a ser mayor. En la figura 2.2 B se muestra un colector de este tipo.

Los colectores de tubos evacuados son más caros que los de placa plana, sin embargo, se requeriría un menor número y una menor área de terreno para el mismo nivel de producción de energía. Por otro lado, debido a que este tipo de colector consigue temperaturas de hasta 200 [°C], aproximadamente, resultan adecuados para ser utilizados como fuente de energía en procesos de desalinización [20,21].

#### **2.3.1.3 Colector parabólico compuesto**

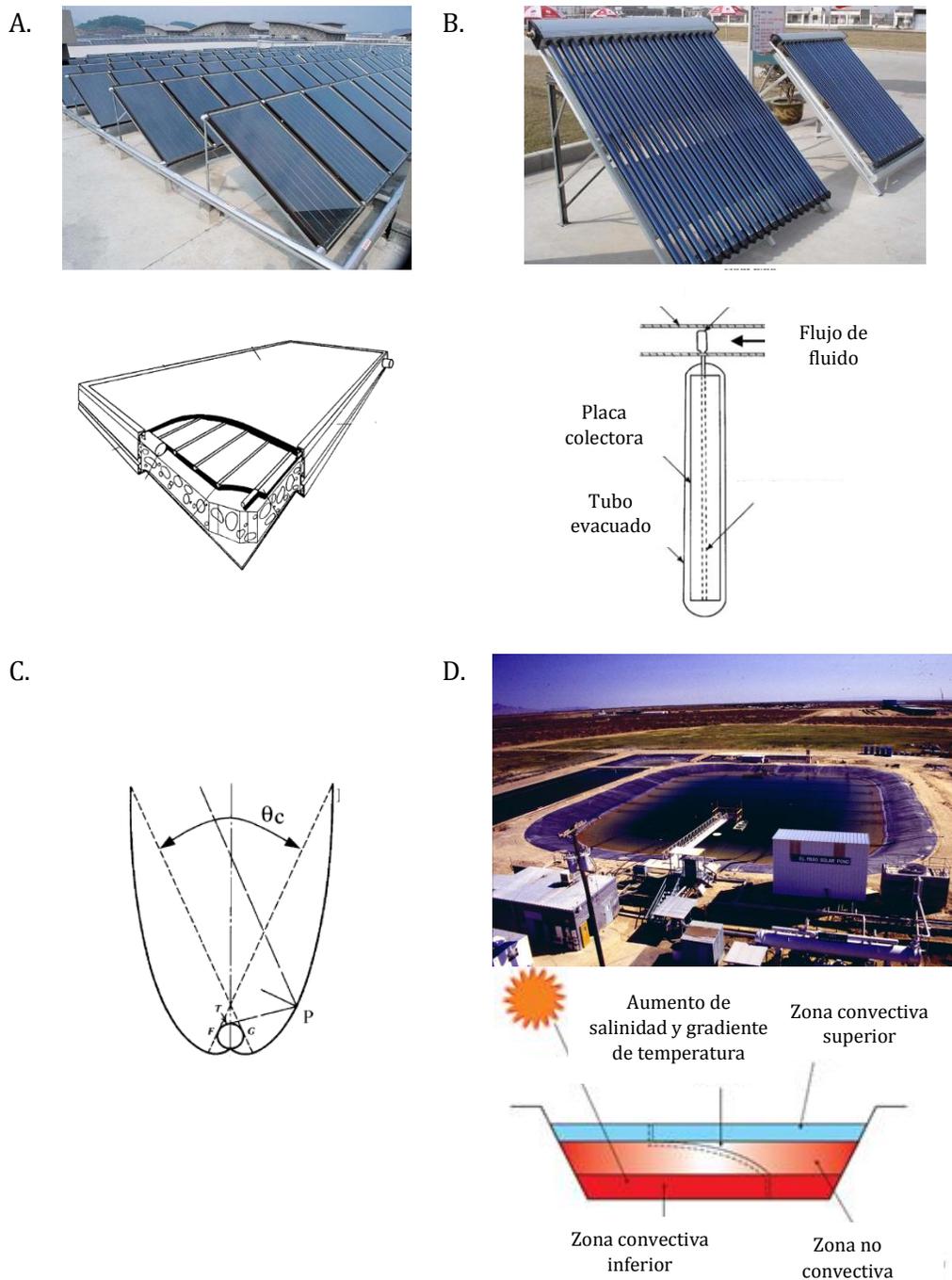
Los colectores parabólicos compuestos pueden aceptar la radiación incidente sobre un rango relativamente amplio de ángulos. Usando múltiples reflexiones internas, cualquier radiación que entra a la apertura, dentro del ángulo de aceptación, es conducida hacia la superficie absorbente que se ubica en el fondo del colector. El ángulo de aceptación se define como el ángulo a través del cual una fuente de luz puede ser movida y aún converger hacia el absorbedor.

Con esta configuración la necesidad de mover el colector para acomodarlo al cambio de la orientación solar puede ser reducida usando una depresión con dos secciones de una parábola mirándose una a otra, como se muestra en la Figura 2.2 C [20].

#### **2.3.1.4 Tanque solar de gradiente salino**

Es un tanque superficial que presenta un gradiente salino vertical, de manera que el agua con mayor concentración de sal permanece en el fondo del tanque y no se mezcla con la capa superior de agua menos salada. En la zona media tiene un gradiente de sal no convectivo que actúa como aislante, previniendo la convección y las pérdidas de calor hacia la superficie.

Este tipo de colector incluye su propio sistema de almacenamiento. El agua altamente salina del fondo absorbe la radiación directa y difusa, alcanzando temperaturas entre 70 [°C] y 85 [°C], y no puede subir debido a su gran densidad. El calor almacenado puede ser utilizado en procesos térmicos o para producir electricidad [21].



**Figura 2.2.** Colectores solares estacionarios. A. Placa plana, B. Tubos evacuados, C. Parabólico compuesto, D. Tanque solar con gradiente salino [20].

### 2.3.2 Colectores concentradores con sistema de seguimiento del sol

Mayores temperaturas que las obtenidas con colectores estacionarios no concentradores pueden ser alcanzadas si una amplia fracción de la radiación solar es concentrada en un área de colección relativamente pequeña.

En este tipo de colector la energía solar es ópticamente concentrada antes de ser transformada en calor. La concentración puede ser obtenida por reflexión o refracción, usando espejos o lentes. La luz reflejada o refractada es concentrada en una zona focal, aumentando así el flux de energía

en el receptor. De esta forma, se obtiene una mayor eficiencia térmica, debido a la menor área de pérdidas de calor en relación al área receptora. En cuanto a la razón de concentración, ésta puede variar en unos cuantos órdenes de magnitud, desde la unidad a valores sobre 10.000. Cabe destacar que a mayor razón de concentración, mayores son las temperaturas de operación que se pueden alcanzar, en tanto que aumentan los requerimientos de precisión en el posicionamiento del sistema óptico [20].

Los colectores concentradores deben seguir el movimiento diario del sol, lo cual se logra mediante dos métodos. El primero es el método altazimut que requiere que el dispositivo de seguimiento gire en altitud y azimut, permitiendo al colector un seguimiento exacto. El segundo es un sistema de seguimiento en un eje, en el cual el colector sigue al sol en una dirección, este-oeste o norte-sur. Estos sistemas requieren un continuo y preciso ajuste para compensar los cambios en la orientación del sol.

Es importante notar que este tipo de colector solo utiliza la componente directa de la radiación solar; en la mayoría de los casos la radiación difusa no es concentrada. En la Figura 2.3 se pueden apreciar los distintos tipos de colectores concentradores que se presentan a continuación.

### **2.3.2.1 Colector cilindro parabólico**

Estos colectores están hechos de una lámina de un material reflector curvada en forma parabólica que concentra la radiación solar en un tubo receptor ubicado a lo largo de la línea focal [20].

El receptor de un cilindro parabólico es lineal. Comúnmente, su superficie es cubierta con un revestimiento selectivo que tiene una alta absorbanza para la radiación solar, pero baja emisividad para las pérdidas por radiación térmica. Usualmente, una cubierta de vidrio es puesta alrededor del receptor para reducir las pérdidas de calor por convección, lo que en algunos casos se ve favorecido al evacuar el espacio entre ésta y el receptor [20,21].

Este tipo de colector requiere un sistema de seguimiento del sol en un solo eje. De esta manera, puede alcanzar temperaturas de operación entre 100 [°C] y 400 [°C].

Los colectores cilindro parabólicos constituyen la principal tecnología de Concentración Solar de Potencia, CSP. Con más de 30 años de operación, desde los Sistemas de Generación de Energía Solar (SEGS, por sus siglas en inglés) en Estados Unidos, y con 4,2 [GW] de capacidad instalada a nivel mundial (90% de la capacidad instalada CSP), hoy es una tecnología madura que ha experimentado mejoras considerables en el diseño y que domina el mercado [23,24,25].

### **2.3.2.2 Colector Fresnel lineal**

Esta tecnología se basa en un arreglo de filas de espejos largos y planos o ligeramente curvados, situados muy próximos al suelo, los cuales siguen el movimiento del sol en un eje y enfocan la radiación en un receptor lineal fijo que se eleva por sobre los espejos [20,26].

El uso de espejos de vidrio planos se constituye como una de las principales ventajas de este tipo de colector, ya que significa una simplificación del sistema de montaje y una reducción de costos respecto a la tecnología cilindro parabólica; asimismo, la superficie de espejo por receptor es

superior. Por otro lado, al ser montados cerca del suelo, disminuyen los requerimientos estructurales.

A pesar de las ventajas en cuanto a costos que presenta esta tecnología CSP, ha logrado un bajo nivel de desarrollo; su capacidad instalada actual representa menos de un 5% de la capacidad instalada total CSP a nivel mundial. Cabe destacar que al año 2010, todas las plantas Fresnel lineal eran de prueba y ninguna incorporaba sistema de almacenamiento térmico, motor principal de desarrollo de la tecnología CSP por estos días [24,27].

### 2.3.2.3 Colector disco parabólico

Un reflector de disco parabólico es un colector de foco puntual que sigue el sol en dos ejes, concentrando la energía solar en un receptor localizado en el punto focal del disco. Habitualmente, acoplado al elemento receptor, se tiene un motor *Stirling* para generar electricidad [20,23].

Esta tecnología se caracteriza por presentar elevadas razones de concentración, con un máximo teórico cercano a 10.000, alcanzando temperaturas sobre 1.000 [°C]. Así, son altamente eficientes en la absorción de energía solar y en la conversión de energía térmica a electricidad, siendo este último su principal uso [23].

### 2.3.2.4 Sistema de receptor central

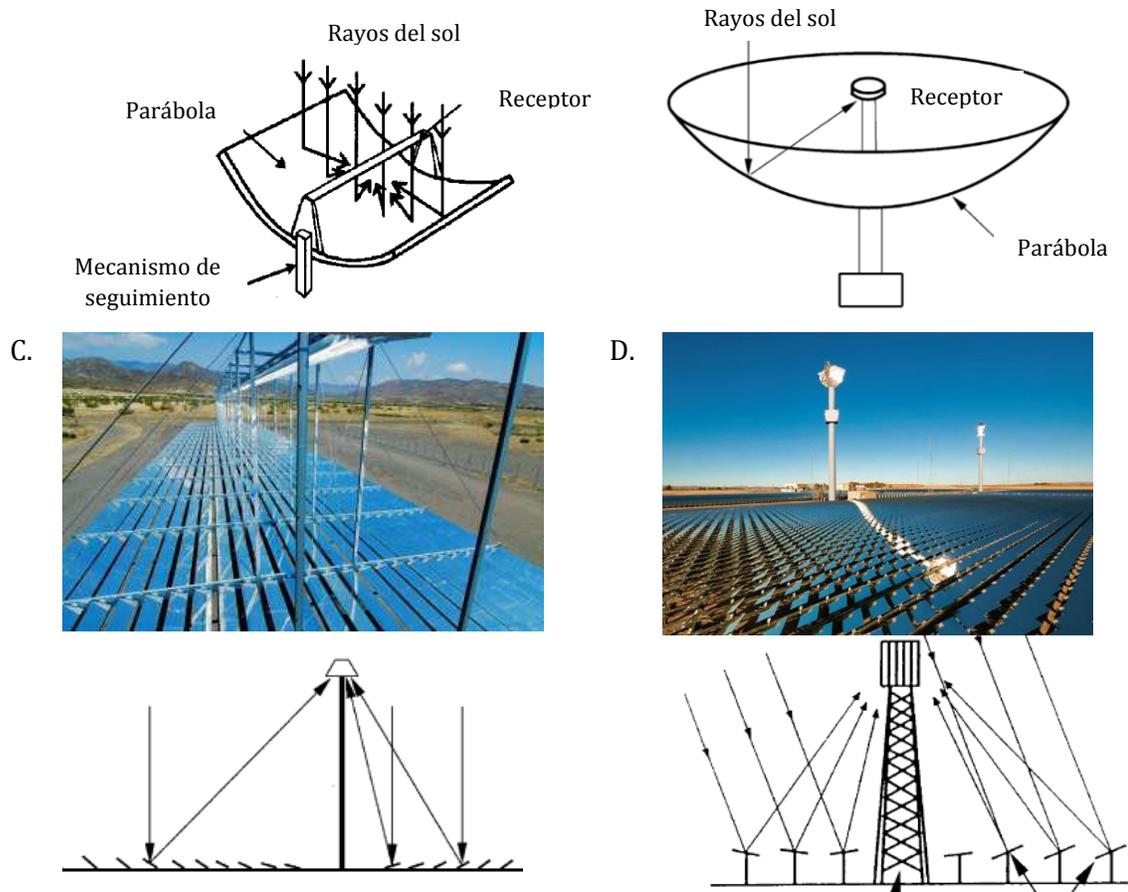
El sistema de receptor central consiste en múltiples espejos planos, conocidos como helióstatos, que reflejan la radiación solar incidente hacia un receptor central ubicado en lo alto de una torre fija. Cada uno de ellos posee un sistema independiente de seguimiento del sol en dos ejes que permite orientarlo de manera que la radiación reflejada por todos ellos se concentre en el receptor [20,23,28].

Existen dos esquemas de operación; el primero utiliza sales fundidas como medio de transferencia de calor y de almacenamiento térmico, mientras que en el segundo se genera vapor directamente en el receptor.

Estos sistemas presentan razones de concentración entre 300 y 1.500, alcanzando temperaturas sobre 1.500 [°C], con altas eficiencias de colección y de conversión de energía térmica a eléctrica.

Sin bien el número de plantas de receptor central existentes es reducido, en los últimos años esta tecnología ha ido captando mayor atención y es la que presenta mayores posibilidades de desarrollo tecnológico [23].





**Figura 2.3.** Colectores concentradores. A. Cilindro parabólico, B. Disco parabólico, C. Reflector Fresnel lineal, D. Campo heliostático [20,22].

## 2.4 Aplicaciones de la energía solar en procesos evaporativos

El uso de la energía solar en procesos evaporativos se remonta a muchos siglos atrás, en su aplicación en el secado de sólidos y la producción de sal a partir de salmueras. Esta última es una operación que se desarrolla a gran escala y aproximadamente un tercio de la producción mundial anual de sal se realiza mediante este método. Asimismo, los procesos de destilación de agua salobre o de agua de mar para obtener agua fresca se han constituido como una solución económica y factible en zonas con escasez de agua alrededor del mundo [18].

El aumento de la población mundial junto con el crecimiento de las actividades agrícolas e industriales ha contribuido al agotamiento y contaminación de las fuentes de agua fresca. El suministro de agua potable se ha convertido en un importante problema que hoy deben enfrentar los países en desarrollo y que amenaza la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia. Además, cabe destacar que un gran porcentaje de la población que no tiene acceso a agua potable vive en zonas rurales y áridas que solo cuentan con fuentes de agua subterránea con una alta salinidad; su ubicación remota y baja densidad poblacional hace muy difícil la instalación de sistemas de tratamiento de agua convencionales y la conexión a una red de distribución tiene un costo extremadamente alto [21,29].

En este contexto, la obtención de agua potable mediante desalinización de agua de mar o de agua salobre se presenta como una atractiva solución. Debido a que estos procesos son intensivos en el uso de energía, y sumándose a esto el problema asociado a los combustibles fósiles, la destilación solar es un método fácil y económico de alcanzar el objetivo [29].

#### 2.4.1 Desalinización solar

En la naturaleza la desalinización solar ocurre a gran escala en el ciclo hidrológico. La radiación solar es absorbida por los mares y otras superficies húmedas, causando la evaporación del agua. El vapor de agua asciende en la atmósfera y es transportado por las corrientes de aire. Una vez que se enfría hasta la temperatura de punto de rocío, ocurre la condensación, formándose pequeñas gotas que se van haciendo cada vez más pesadas hasta que por gravedad comienzan a caer a la superficie, produciéndose las precipitaciones [21].

Los destiladores solares hechos por el hombre se basan en este mismo principio de evaporación y condensación. Diferentes diseños de destiladores han sido usados alrededor del mundo, sin embargo, el más simple y de uso más extendido en comunidades remotas es el destilador solar de bandeja, conocido también como destilador tipo caseta. Su uso a gran escala se remonta a la segunda mitad del siglo XIX, cuando el ingeniero Charles Wilson diseñó la primera planta de desalinización usando energía solar térmica para la Oficina Salitrera Lastenia, en el desierto de Atacama. Esta planta contaba con cerca de 5.000 [m<sup>2</sup>] de destiladores solares convencionales, produciendo alrededor de 20.000 litros de agua fresca por día [20,23].

En la Figura 2.4 se muestra una representación esquemática de este tipo de destilador. Consiste en una bandeja con el fondo de color negro que contiene el agua salobre o salina, sobre la cual existe una cubierta transparente que presenta cierta inclinación. La radiación solar incidente pasa a través de esta cubierta y es absorbida por la superficie de la bandeja, transformándose en energía térmica. Esta última es transferida al agua, aumentando su temperatura y provocando su evaporación. El vapor asciende hasta la superficie interna de la cubierta transparente —a menor temperatura— donde se enfría y condensa. Debido a la gravedad, el agua pura escurre a través de la pendiente de la cubierta, pudiendo ser recolectada [20,29].

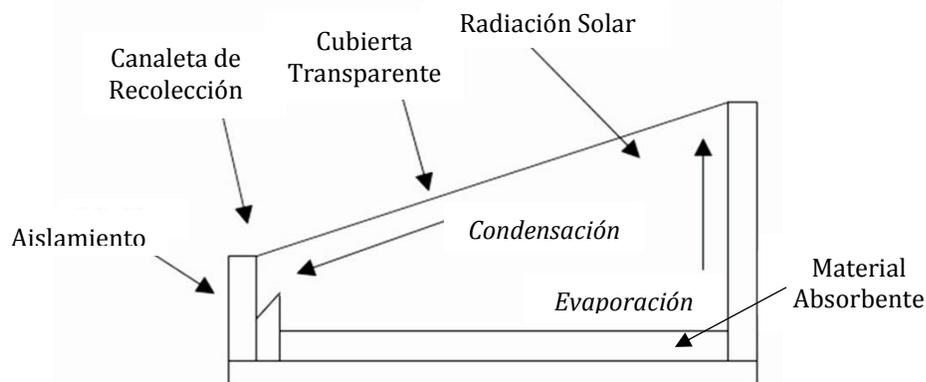


Figura 2.4. Esquema de un destilador solar de bandeja de un efecto [29].

Los destiladores solares han demostrado ser una solución económica —con un bajo costo de mantención y operación— y segura de suministro de agua pura en áreas remotas del mundo, los

que contruidos y mantenidos adecuadamente pueden tener una vida útil superior a 25 años. La alta calidad del agua obtenida se debe a que todas las sales, compuestos orgánicos e inorgánicos, y microorganismos quedan en la salmuera. No obstante lo anterior, se caracterizan por su baja productividad, la que varía entre 2-5 [L/m<sup>2</sup> · día], y también por su baja eficiencia térmica y considerable requerimiento de área. Además, la producción de agua depende de la intensidad de la radiación solar, es decir, varía a lo largo del día y del año [21].

Por esto, se han llevado a cabo numerosos estudios que buscan lograr un aumento de la productividad y eficiencia térmica de los destiladores solares. En algunos casos se han propuesto modificaciones simples a la geometría del equipo o los materiales utilizados, mientras que en otros se utilizan sistemas de condensación o colectores de la energía solar adicionales [30,31]. A continuación se describen diversos métodos para la mejora del desempeño reportados en la literatura.

#### **2.4.1.1 Modificaciones a parámetros que afectan la productividad y eficiencia del destilador**

Las transferencias de calor desde la cubierta de vidrio hacia la atmósfera y desde la bandeja que contiene el agua salobre hacia la cubierta dependen de las condiciones atmosféricas imperantes, como la intensidad de la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento, además de la latitud y longitud del lugar donde esté instalado el destilador y de parámetros del equipo como el grosor de la cubierta, orientación e inclinación, área de absorción, profundidad del agua y propiedades de los materiales utilizados. Modificaciones en cada uno de estos factores buscan, en general, incrementar la tasa de evaporación aumentando la diferencia de temperatura entre el agua a destilar y la cubierta [30,32].

#### **Optimización de la cubierta**

La cubierta del destilador debe ser de un material que presente una alta transmisividad para la radiación solar, permitiendo que ésta alcance la bandeja para ser absorbida en ella. Asimismo, debe tener una baja transmisividad para la radiación de onda larga emitida por la bandeja, evitando que ésta se pierda al ambiente y manteniendo, por tanto, el efecto invernadero. Por otro lado, debe permitir la condensación del vapor de agua y su posterior recolección.

Los materiales frecuentemente utilizados en la cubierta son el vidrio y el plástico, aunque se prefiere el primero, debido a que presenta una mayor transmisividad a la radiación solar para varios ángulos de incidencia y una mayor vida útil. Además, la superficie se humedece y permite una condensación en película, lo que resulta en una menor pérdida de transmisividad. En el caso del plástico, éste se degrada producto de la radiación ultravioleta y la condensación en él es más dificultosa. Estudios han demostrado que el vidrio templado con bajo contenido de hierro resulta adecuado para este uso, ya que es altamente transparente y más resistente al impacto. En cuanto al grosor, se tiene que la tasa de transferencia de calor a través de la cubierta aumenta en la medida en que éste disminuye.

Dado un material, para un menor ángulo de incidencia de los rayos del sol, la transmisividad es mayor, mientras que la reflectividad es menor. La inclinación y dirección de la cubierta dependen de la latitud. Para latitudes bajas se prefiere una cubierta de doble pendiente en dirección norte-

sur, mientras que para latitudes mayores a  $20^\circ$  se prefiere una única pendiente, la cual debe mirar hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur. Si se utiliza doble pendiente en latitudes más altas, solo un lado de la cubierta recibirá los rayos del sol, quedando el otro hacia la sombra.

En cuanto a la inclinación, ésta varía entre  $10^\circ$  y  $25^\circ$ . Ángulos de inclinación menores pueden favorecer la formación de grandes gotas de agua que caen de vuelta a la bandeja con agua salina. Por su parte, inclinaciones superiores a  $25^\circ$  significan un mayor requerimiento de material, sin un aumento considerable en la productividad; y un incremento del espacio dentro del destilador, con lo que aumenta también la distancia entre la superficie del agua y la cubierta y disminuye la eficiencia. Muchos estudios se han llevado a cabo en relación a la inclinación óptima de la cubierta, sin embargo, los resultados obtenidos difieren unos de otros.

La eficiencia del destilador aumenta en la medida en que la diferencia entre las temperaturas del agua y la cubierta sea lo más grande posible, lo que significa una mayor diferencia en la presión de vapor entre ambas superficies. Una forma de lograr esto, desde el punto de vista de la cubierta, es bajar su temperatura, condición que puede alcanzarse mediante una película de agua de enfriamiento que fluye de manera constante o intermitente sobre ella. Por otro lado, se tiene que a mayor velocidad del viento, mayor es la transferencia de calor por convección desde la cubierta hacia el ambiente, causando una disminución de su temperatura; por esto, en algunos casos se ha probado el uso de ventiladores en la parte superior del destilador para causar este efecto.

### **Optimización de la bandeja**

Las funciones de la bandeja son recibir toda la radiación que pasa a través de la cubierta con las mínimas pérdidas por reflexión y por conducción hacia el ambiente. La evaporación del agua depende de la circulación por convección natural de la masa de aire dentro del destilador y del área de exposición del agua a esta masa.

Investigaciones muestran que la profundidad del agua es inversamente proporcional a la productividad del destilador, es decir, la productividad disminuye con un aumento de la profundidad del agua. Esto último durante las horas de luz, ya que durante la noche se observa lo contrario. Para una baja profundidad, la capacidad calorífica volumétrica del agua es menor y, por lo tanto, la temperatura alcanzada por el agua será mayor. Esto va a aumentar la tasa de evaporación y productividad, pero cualquier cambio en la radiación solar va a tener un efecto inmediato en la temperatura del agua. La producción nocturna es muy baja en este caso. Por el contrario, una mayor profundidad del agua aumenta la capacidad calorífica volumétrica, esto reduce la temperatura del agua para una entrada de radiación dada, pero la temperatura y tasa de producción son uniformes y no se van a ver afectadas por una variación repentina en la intensidad de la radiación incidente.

En cuanto a los materiales utilizados en la construcción de la bandeja se tiene el concreto, madera impregnada con resinas epóxicas, acero inoxidable, aleaciones de aluminio-magnesio y, en algunos casos el material absorbente negro actúa como bandeja, puesto directamente en el suelo o sobre arena. En cuanto al material absorbente de la radiación solar, típicamente, se utiliza un

revestimiento sobre la bandeja que suele ser una lámina de un plástico resistente a las altas temperaturas, como caucho butílico o polietileno negro.

Alrededor de un 11% de la radiación recibida por el destilador es reflejada sin ser utilizada. Esta pérdida puede ser minimizada si se aumenta el coeficiente de absorción de la bandeja y del agua. Un método simple para lograrlo consiste en añadir un pigmento al agua. Cuando esto se hace, la radiación solar es absorbida por la capa superior, aumentando su temperatura, y con ello, la tasa de evaporación. Resultados muestran que el pigmento negro es el más eficaz en el aumento de la absorción y, por ende, de la productividad. El efecto del pigmento es mayor en bandejas profundas que en poco profundas.

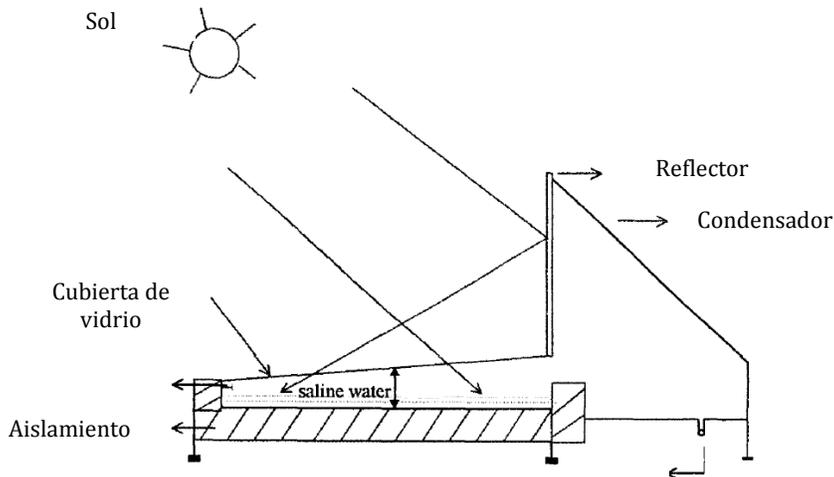
En cuanto al incremento de la temperatura del agua para aumentar la diferencia de presión de vapor entre ésta y la cubierta, se ha probado el uso de absorbedores suspendidos. Estos consisten en una placa que separa la superficie superior del agua. La radiación es recibida por esta placa y parte de ella es usada para calentar la capa de agua que queda encima, lo que requiere menos energía que el calentamiento de la masa de agua entera. El material utilizado y su grosor son parámetros que afectan la productividad; se ha probado placas de aluminio, cobre, acero inoxidable, vidrio y mica.

### **Pre calentamiento del agua salina y uso de condensador externo**

En un destilador convencional la superficie interna de la cubierta es la única área disponible para la condensación. La diferencia de temperatura entre su superficie inferior y superior es pequeña y restringida por las condiciones de operación del sistema, por lo que limita también la tasa de condensación, lo que conlleva a una baja eficiencia del destilador. La tasa de condensación puede aumentarse proveyendo un área adicional para que este fenómeno ocurra. Cuando se usa un destilador de doble pendiente en lugares de latitudes más altas, puede construirse con uno de sus lados inclinado tal que sea paralelo a los rayos del sol, quedando siempre a la sombra, y actuando como un condensador integrado [30,31].

Una pequeña modificación a este sistema de doble pendiente, mostrado en la Figura 2.5, consiste en utilizar el lado de la cubierta destinada a evaporación con una mínima inclinación. Además, este sistema incorpora un reflector para aumentar la radiación solar incidente en la cubierta y para hacer sombra al condensador [33]. Una fracción del vapor resultante condensa en la superficie sobre el espacio de evaporación, mientras que el resto es purgado hacia la superficie de condensación externa a través de una ranura, debido a la diferencia de presión entre el pequeño volumen en el evaporador (evaporación continua resulta en una alta presión) y el mayor volumen del condensador (baja presión), la cual existe como resultado de la variación de densidad entre el evaporador y condensador causada por el gradiente de temperatura en el fluido [33,32].

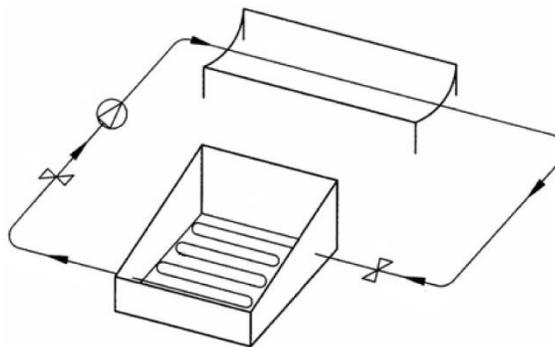
Esto minimiza la presión dentro del evaporador y la formación de gotas en la superficie interna de la cubierta, lo que tiene como consecuencia una disminución de la reflexión y absorción de la radiación; esto es, una mayor proporción es transferida al agua, mejorando la evaporación. Con esta modificación la eficiencia del destilador mejoró hasta un 70% para las condiciones meteorológicas donde se ensayó [33].



**Figura 2.5.** Destilador solar acoplado a un destilador externo (adaptado de [33]).

Como se mencionó antes, la tasa de evaporación en el destilador se puede aumentar maximizando la diferencia de temperatura entra el agua y la cubierta (o superficie de condensación). Esto puede lograrse precalentando el agua salina a destilar mediante una fuente externa de calor [34,35].

Como método de precalentamiento se ha utilizado un colector de placa plana acoplado al destilador convencional, en que el agua a destilar absorbe la energía solar a medida que circula por el colector y luego ingresa al destilador, donde se evapora [36]. Por otro lado, también se ha utilizado un concentrador cilindro parabólico (Figura 2.6), con el uso de aceite como fluido de transferencia de calor, el cual fluye en un ciclo a través de la tubería focal del colector, donde aumenta su temperatura y luego lo transfiere al agua por medio de una tubería instalada en el fondo del destilador [37]. En ambos casos, se ha reportado un aumento de la productividad, llegando a un 70% de eficiencia para el segundo, esto para las condiciones meteorológicas del lugar donde se llevaron a cabo los ensayos.



**Figura 2.6.** Sistema de destilación solar acoplado a un colector cilindro parabólico [37].

### 3 Caso de estudio

Como caso de estudio se considerará el Relleno Sanitario Loma Los Colorados (RSLLC), diseñado y operado por KDM Tratamiento, de KDM Empresas. Este relleno está ubicado en el kilómetro 65 de la Ruta 5 norte, 3 kilómetros al norte de la localidad de Montenegro, comuna de Til Til. En la Figura 3.1 se muestra una vista aérea de sus instalaciones.



**Figura 3.1.** Vista aérea del RSLLC.

Este relleno que comenzó a operar el año 1995, ocupa una superficie de 800 hectáreas, de las cuales 220 están destinadas a la construcción de celdas para disposición de residuos, propiamente tal, siendo el más grande a nivel nacional. Contempla dos etapas de explotación, proyectando una vida útil hasta el año 2055; actualmente, se encuentra en la primera, con alrededor de 90 hectáreas ya cubiertas con residuos.

Antes de llegar al relleno sanitario, los residuos provenientes de diversas comunas de la Región Metropolitana pasan por la Estación de Transferencia de Quilicura, donde son descargados y compactados en silos contendedores, para luego enviarlos en tren al sitio de disposición final. Otra parte es enviada en camiones, al igual que los residuos de algunas comunas de la Región de Valparaíso, como Olmué y Zapallar.

Así, cada día llegan al relleno sanitario entre 8 y 9 trenes, con 27 silos cada uno, lo que se traduce en la recepción de alrededor de 7.000 toneladas diarias. Ahí cada silo es traspasado a un camión de transferencia que lo lleva al frente de trabajo, lugar donde finalmente se descargan los residuos para su posterior acomodación y compactación.

En cuanto a las corrientes que se generan producto de la operación del relleno, el biogás es captado por un sistema de pozos verticales ubicados en la superficie y, posteriormente, es aprovechado en la generación de electricidad para su inyección al Sistema Interconectado

Central. Por su parte, los lixiviados son sometidos a tratamiento biológico y luego son recirculados al relleno.

Este relleno recibe residuos de origen domiciliario y asimilables. Aproximadamente, 650 toneladas del total de residuos que llega al mes corresponde a material pre-seleccionado. De esta masa, se recupera alrededor del 30%, el que es comercializado para reciclaje. Así, el porcentaje de recuperación es ínfimo en relación a la masa de residuos que va a disposición final.

### **3.1 Sistema actual de tratamiento de lixiviados**

El sistema de gestión de lixiviados ha sufrido diversas modificaciones desde el comienzo de la operación del relleno hasta su configuración actual. En sus inicios, el lixiviado era recirculado al relleno sin ningún tipo de tratamiento, alternativa de gestión permitida por la normativa, mientras no afectara la estabilidad estructural de la instalación ni causara el afloramiento de líquidos en los taludes del relleno. Además, ya se contaba con piscinas de acumulación.

Posteriormente, en el año 2001, se aprueba la planta de tratamiento de lixiviados —de carácter biológico— que permitía obtener un efluente que cumplía con la norma de descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (D.S. N°90/00); así, el lixiviado era descargado a una quebrada cercana.

Luego, en el año 2006, se aprueban modificaciones a esta planta de tratamiento que permiten su descarga al sistema de alcantarillado, cumpliendo con el D.S N°609/98. De esta manera, el lixiviado era enviado en trenes hasta una cámara de descarga ubicada en la comuna de Estación Central. Por otro lado, estas modificaciones incorporaban una alternativa de tratamiento terciario —una planta de osmosis inversa y un filtro de carbón activado— que permitía el cumplimiento del D.S. N°90/00. Sin embargo, estas alternativas no prosperaron y durante los años siguientes continuó aumentando la capacidad de acumulación en piscinas.

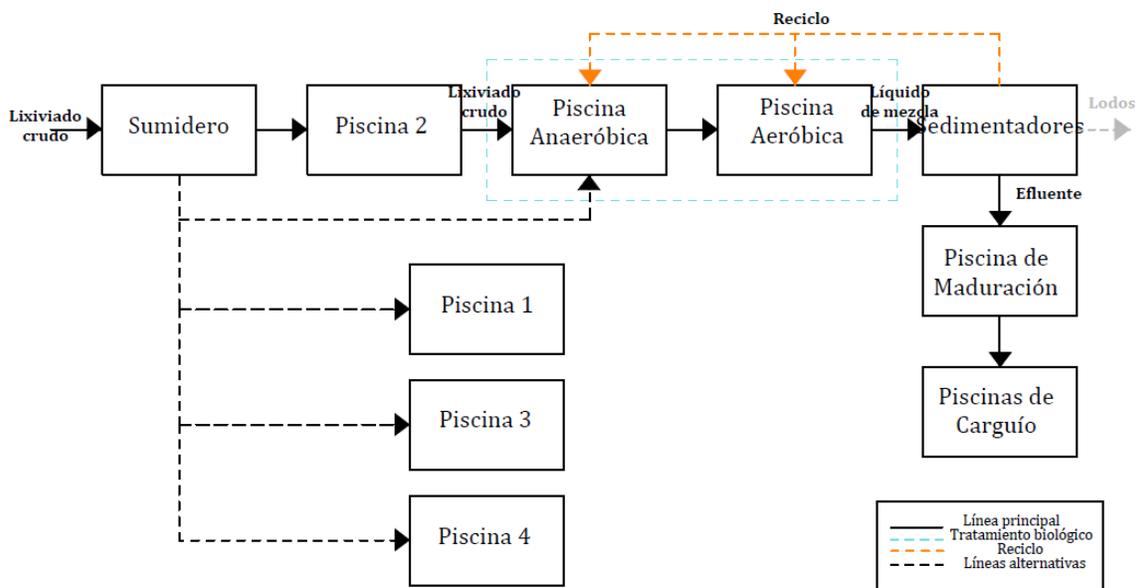
Actualmente, el sistema de tratamiento es solo biológico y se cuenta, además, con cuatro piscinas de acumulación (*P1, P2, P3 y P4*), una de maduración y dos piscinas de carguío, donde camiones aljibes cargan el lixiviado para su posterior recirculación al relleno. Este proceso de tratamiento actual es descrito en los párrafos siguientes.

El lixiviado generado en el relleno es captado por un sistema de tuberías que lo conducen hacia un sumidero, desde donde es enviado por gravedad hacia una de las piscinas de acumulación (*P2*) o directamente al sistema de tratamiento biológico, mediante bombeo.

El sistema de tratamiento biológico consiste en una piscina anaeróbica, cuyo principal objetivo es la reducción de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular, con la consecuente producción de metano y dióxido de carbono; seguida por una piscina aeróbica, donde se busca alcanzar una segunda etapa de reducción de la materia orgánica y eliminación de sólidos no sedimentables, en presencia de oxígeno. Esta piscina es aireada a través de difusores y aireadores mecánicos. El tiempo de residencia varía entre 28 y 35 días, mientras que el de la anaeróbica es de alrededor de 45 días.

El líquido de mezcla generado en la piscina aeróbica se conduce a dos sedimentadores para separar el lixiviado tratado (efluente) de las células nuevas y antiguas (lodo biológico). Una fracción del lodo se recircula a la piscina aeróbica para mantener la concentración de células deseada, mientras que la otra se purga del sistema. Se cuenta con un filtro banda para el deshidratado de lodos, sin embargo, actualmente no se utiliza, ya que su tasa de producción ha disminuido considerablemente en los últimos años. Por lo tanto, en la actualidad, todo el lodo que se genera es recirculado tanto a la piscina aeróbica como a la anaeróbica.

El efluente es enviado a la piscina de maduración o directamente a las piscinas de carguío en caso de no estar operativa la primera. En estas piscinas también experimenta evaporación, producto de las condiciones ambientales a las que está expuesto; lo mismo ocurre en las demás. En la Figura 3.2 se muestra un diagrama del proceso de tratamiento actual.



**Figura 3.2.** Diagrama sistema de tratamiento actual.

En cuanto a la disposición final del efluente, éste es recirculado al relleno por medio de camiones aljibes que lo toman desde las piscinas de carguío y lo descargan en pozos de recirculación, construidos para este propósito. Asimismo, el efluente es utilizado para el riego de caminos impermeabilizados o recirculado a pozos de biogás, sin embargo, esto último no se ha realizado durante este año. Cabe destacar que la tasa de recirculación está limitada por la capacidad y disponibilidad de los camiones; una parte importante se acumula en las piscinas, ocupando, usualmente, alrededor de un 80% de su capacidad.

Además, la planta de tratamiento cuenta con un laboratorio donde se miden ciertos parámetros de muestras tomadas en distintos puntos del recorrido que hacen los lixiviados desde el sumidero hasta la piscina de maduración. Asimismo, se realiza un monitoreo a través de un laboratorio externo que compara los parámetros medidos con los que estipula el D.S N°90/00, aunque este último no aplica, ya que no hay descarga de efluentes a un cuerpo de agua superficial. En el Anexo A se muestran los valores promedio de los parámetros obtenidos en el sumidero y a la salida de los sedimentadores, de acuerdo al análisis realizado por el laboratorio interno

durante el año 2015, junto con los valores que estipula la mencionada norma. Además, se muestra una fotografía de una muestra a la salida de un sedimentador.

Como se describió antes, los lixiviados están siendo tratados, no obstante, no aplica ninguna norma de descarga, ya que estos son recirculados al relleno. De esta forma, no existe eliminación ni recuperación de algún componente que pudiese tener algún valor, como el agua, por ejemplo.

La generación de lixiviados depende fuertemente de las corrientes de agua que pudiesen ingresar a la masa de residuos, siendo —típicamente— las más importantes las que provienen de las precipitaciones. En este caso, si bien la recirculación aporta a la humectación del relleno, es también una entrada adicional de agua que llevaría a un aumento de la producción de estos líquidos contaminantes. Asimismo, se tiene la acumulación del lixiviado en las diversas piscinas, las que han ido aumentando en número en los últimos años.

Ante esto, resulta necesario pensar en alternativas de tratamiento sustentables que permitan reducir el volumen de lixiviado que se recircula o que se acumula, y poder aprovechar parte del agua contenida en él, considerando el problema de la escasez de agua y, sin ir más lejos, que toda el agua que se consume en el relleno —en las instalaciones y riego de caminos y vegetación— es traída en camiones aljibes desde localidades aledañas.

## 4 Sistema propuesto

Se propone un sistema de tratamiento de lixiviados que se incorpore como una etapa adicional, posterior al tratamiento biológico actual, y que permita la obtención de un residuo sólido o semi-sólido, altamente concentrado, cuyo manejo sea más fácil y seguro. Al mismo tiempo, se espera conseguir una corriente líquida con una menor carga contaminante, a la que se le pudiera dar algún uso alternativo; riego, por ejemplo. Esta propuesta busca reducir el volumen de líquido que se recircula al relleno, así como el que se acumula en las piscinas; mediante el uso de una fuente de energía limpia y renovable.

En cuanto a los equipos de secado, hay algunos secadores que evaporan completamente disoluciones y suspensiones. Tres ejemplos típicos son: secadores de pulverización, secador de película delgada y secador de tambor. En muchos casos su operación y geometría son complejas, lo que sumado al carácter altamente corrosivo e incrustante de los lixiviados, ocasionaría problemas operacionales que harían inviable la elección de esta opción [17].

Asimismo, a lo largo de los años se han desarrollado diversas tecnologías de desalinización; siendo la destilación multiefectos (MED), destilación flash multietapas (MSF) y osmosis inversa las más importantes, comercialmente hablando. Las dos primeras se basan en procesos de cambio de fase, permitiendo el uso de energía solar térmica, según se plantea en este trabajo. Sin embargo, al igual que en el caso de los secadores, se descartan por los problemas asociados a la formación de incrustaciones que se depositan en la superficie de transferencia de calor, la que involucra un importante número de tubos (y de cámaras o “efectos”), cuya limpieza es dificultosa. Por su parte, la osmosis inversa es una tecnología de membrana y utiliza energía eléctrica, por lo que queda fuera del alcance de esta memoria [21].

Teniendo en cuenta la evaporación solar como uno de los métodos utilizados en el tratamiento de lixiviados y su extendido uso en la producción de sales a partir de salmueras y en la desalinización de aguas salobres y de mar para obtención de agua potable, se propone un método basado en este fenómeno para el secado de dichas corrientes líquidas.

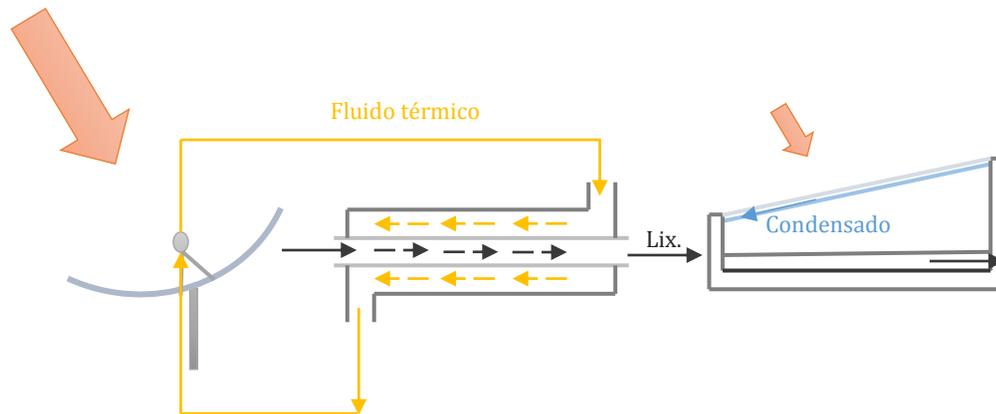
Considerando, por otro lado, que los destiladores solares son uno de los equipos más simples y ampliamente usados para la desalinización, y que permiten la obtención de agua de alta calidad, dejando microorganismos y compuestos orgánicos e inorgánicos en la salmuera, se plantea un sistema basado en el mecanismo de operación de un destilador solar de bandeja convencional, sujeto a las características especiales que presenta el lixiviado en relación al agua de mar.

Como se mencionó en la sección 2.4.1, a pesar de que los destiladores solares han demostrado ser una solución segura para el suministro de agua pura, estos se caracterizan por su baja productividad y considerable requerimiento de área. Es por esto que como una forma de aumentar su eficiencia se propone precalentar el lixiviado antes de que ingrese al destilador, utilizando para esto energía solar.

Así, el sistema propuesto consiste en un campo de colectores solares que captan la radiación solar y la transforman en energía térmica de un fluido de transferencia de calor —un aceite en este

caso— que circula a través de él. Este fluido aumenta su temperatura y transfiere la energía absorbida al lixiviado por medio de un intercambiador de calor, donde se enfría y vuelve al campo solar, completando un ciclo. De esta forma, el lixiviado aumenta su temperatura antes de entrar al destilador, donde se evapora y condensa. En la Figura 4.1 se muestra una representación esquemática del sistema.

Como entrada se tomará el efluente a la salida de los sedimentadores, considerando que si el tratamiento actual opera en las condiciones adecuadas, entonces la corriente a tratar tendrá un menor contenido de sales (que afectan la evaporación) y una menor carga contaminante, en general.



**Figura 4.1.** Diagrama del sistema de tratamiento propuesto.

Se contempla el uso de colectores cilindro parabólicos, tecnología madura que permite entregar la energía captada a una mayor temperatura que un colector no concentrador estacionario, aumentando, por tanto, la eficiencia. Al tener un sistema de seguimiento en un eje, resulta más sencillo de implementar que uno que se mueva en dos ejes y, dados sus aproximadamente 30 años de operación, cuenta con una confiabilidad técnica y comercial respecto a las demás tecnologías CSP. En particular, se considera la tecnología microCSP, alternativa más pequeña y modular que la CSP de gran escala, y utilizada también en la generación de electricidad, calor de proceso y acondicionamiento de aire. Para estas últimas dos aplicaciones, las plantas existentes tienen capacidades térmicas que varían entre 0,1 [MW] y 1 [MW] [38,39].

Se incluye también un intercambiador de calor de doble tubo o tubos concéntricos, esto dado que su geometría es más sencilla, pudiendo ser menos dificultosa la limpieza y mantención. En esta configuración el lixiviado fluye por el tubo interno, en tanto que el fluido térmico lo hace por el espacio anular entre ambos tubos, a contraflujo, es decir, entran por extremos opuestos y fluyen en sentidos contrarios; en esta disposición de flujo el gradiente de temperatura es mayor, lo que se traduce en una menor de área. Existen otros tipos de intercambiadores que son más compactos y que presentan una mayor área de transferencia de calor por unidad de volumen, con menores requerimientos de espacio y de material, sin embargo, la naturaleza corrosiva e incrustante del lixiviado limita la elección del tipo de intercambiador y materiales utilizados.

Finalmente, en cuanto al destilador, se considera una bandeja con características similares a las de las actuales piscinas de acumulación existentes en el relleno, es decir, impermeabilizada y revestida con una geomembrana de HDPE de color negro, resistente al ataque de agentes químicos y a la radiación UV y que, además, soporte las temperaturas de operación. Por esta razón, se descartó la transferencia de calor desde el fluido térmico al lixiviado por medio de una tubería instalada bajo la bandeja, ya que ésta no tendría las características de una convencional. Para la cubierta se contempla el uso de vidrio con bajo contenido de hierro, altamente transparente [40].

Se privilegió la elección de un sistema simple que permitiera alcanzar el objetivo de tratamiento, teniendo en cuenta las características de las corrientes a tratar.

## 5 Dimensionamiento del sistema

En este capítulo se presentan los resultados del dimensionamiento de los equipos involucrados en el sistema propuesto; previa definición del caso base, selección inicial de las condiciones de operación y recopilación de propiedades termofísicas de las corrientes. Estos resultados permitirán hacer una recomendación sobre el proyecto desde el punto de vista técnico; los aspectos económico y ambiental se tratan en los capítulos siguientes, completando el análisis. Si bien los valores obtenidos corresponden al caso base, la metodología de cálculo puede extenderse a otros contextos.

### 5.1 Caso base

El caso base fue definido a partir de un balance entre el flujo diario de efluente generado en la planta de tratamiento actual y aquel que es recirculado al relleno, basado en el promedio anual de los flujos diarios correspondientes al año 2015. Se asumió que el volumen de efluente que se recircula diariamente es el requerido para la humectación, sin embargo, éste depende —entre otros factores— de la capacidad de campo del relleno, datos con los que no se cuenta para poder determinarlo. En el Anexo B se presenta el detalle de los flujos tomados para el promedio.

Dado lo expuesto anteriormente, se considera tratar un flujo igual a 120 [m<sup>3</sup>/día], esto es, la fracción del efluente de la planta de tratamiento que se acumula y que, eventualmente, será recirculada. El resumen de los flujos involucrados en el balance se muestra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1.** Flujos involucrados en la definición del caso base.

<b>Corriente</b>	<b>Flujo [m<sup>3</sup>/día]</b>
Lixiviado generado en el relleno	650
Efluente tratado (sistema de tratamiento actual)	250
Recirculación de efluente	130
<b>Flujo a tratar (sistema de tratamiento propuesto)</b>	<b>120</b>

### 5.2 Propiedades de los fluidos

Para los cálculos del dimensionamiento que se presentan en los apartados siguientes son necesarias algunas propiedades termofísicas de las corrientes involucradas. Así, algunas fueron obtenidas de bibliografía, mientras que otras se calcularon a partir de correlaciones dependientes de la temperatura y/o contenido de sales. Para ambos fluidos se utilizaron las propiedades a la temperatura promedio entre la entrada y la salida correspondiente a cada etapa. En las Tablas 5.2 y 5.3 se presentan las propiedades del lixiviado y del fluido térmico, respectivamente; además, se indica la temperatura y la referencia a partir de las cuales fueron obtenidas. Las correlaciones utilizadas se pueden revisar en Anexo C.

**Tabla 5.2.** Propiedades del lixiviado.

Propiedad	Unidad	Valor	Temperatura [°C]	Ref.
Conductividad eléctrica	[mS/cm]	31,49*	-	KDM
Sólidos Totales Disueltos (STD)	[mg/L]	25.190	-	[41]
Salinidad	%	2,519	-	-
Calor específico, $C_{p_{lix}}$	[kJ/kg · K]	4,053	38	[42]
		4,059	58	
Densidad, $\rho_{lix}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1.011,7	38	[42]
Viscosidad dinámica, $\mu_{lix}$	[kg/m · s]	$7,18 \cdot 10^{-4}$	38	[42]
Viscosidad cinemática, $\nu_{lix}$	[m <sup>2</sup> /s]	$7,09 \cdot 10^{-7}$ **	38	-
Conductividad térmica, $k_{lix}$	[W/m · K]	0,628***	38	[43]
Calor latente de vaporización, $\lambda_{lix}$	[kJ/kg]	2.299	60	[42,43]

\* Medición laboratorio interno.

\*\*Se calculó mediante la relación  $\nu = \mu/\rho$

\*\*\*Corresponde a la del agua

**Tabla 5.3.** Propiedades del fluido térmico Xceltherm®600.

Propiedad	Unidad	Valor	Temperatura [°C]	Ref.
Calor específico, $C_{p_{FT}}$	[kJ/kg · K]	2,389	135	[44]
Densidad, $\rho_{FT}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	782,9	135	[44]
Viscosidad dinámica, $\mu_{FT}$	[kg/m · s]	$1,33 \cdot 10^{-3}$	135	[44]
Viscosidad cinemática, $\nu_{FT}$	[m <sup>2</sup> /s]	$1,69 \cdot 10^{-6}$	135	[44]
Conductividad térmica, $k_{FT}$	[W/m · K]	0,127	135	[44]

Como primera aproximación, se puede considerar que la mayoría de las propiedades físicas del lixiviado son similares a las del agua pura, las cuales pueden ser descritas como funciones de la temperatura y presión. Sin embargo, el contenido de sales disueltas hace que estas propiedades se vean modificadas en mayor o menor medida. Si bien la variación porcentual respecto a las propiedades del agua pura puede ser pequeña, puede tener importantes efectos a nivel de diseño de procesos de desalinización [42].

Las correlaciones utilizadas se basan en estudios para el agua de mar, cuyas características no son las mismas del lixiviado, sin embargo, representan de buena manera el efecto de la salinidad en estas propiedades. De esta manera, se tiene que ante un aumento de la salinidad, la densidad y la viscosidad aumentan, mientras que el calor específico y el calor latente de vaporización disminuyen. En el caso de la conductividad térmica, es una de las propiedades de los líquidos más difíciles de medir y, consecuentemente, los datos que existen son limitados. Se han propuesto algunas correlaciones para la conductividad térmica del agua de mar, pero los resultados son cuestionables. Por esto, se utilizó la conductividad térmica del agua [42].

### **5.3 Campo solar**

Para el cálculo del área de colectores solares requerida se utilizó SAM, *System Advisor Model*, programa de descarga gratuita que permite la simulación de modelos de rendimiento y modelos financieros para proyectos de energías renovables. SAM, originalmente llamado *Solar Advisor Model*, fue desarrollado el año 2005 por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, por sus siglas en inglés), en colaboración con el Laboratorio Nacional de Sandia, para su uso en el análisis de oportunidades de mejoras de la tecnología solar por parte del Programa de Tecnologías para la Energía Solar del Departamento de Energía de Estados Unidos. Su nombre actual hace alusión a la incorporación de nuevas tecnologías no solares; por lo demás, se está actualizando permanentemente [45].

SAM permite elegir entre una amplia gama de tecnologías y opciones de financiamiento, simulando el desempeño del sistema en un año y calculando el flujo de caja del proyecto para un período definido por el usuario; pudiendo, además, analizar y comparar múltiples casos en un mismo archivo.

Una vez seleccionados ambos modelos, SAM crea un archivo y carga las entradas con un set de valores predeterminados, los que deben ser modificados por el usuario, de acuerdo a las características del proyecto que se esté analizando. Una vez que se fijan todas las variables de entrada, se corren las simulaciones y se examinan los resultados, los que son presentados en forma de tablas y gráficos. Un análisis típico involucra, entonces, correr las simulaciones, examinar los resultados, revisar las entradas y repetir el proceso hasta que los resultados sean satisfactorios; es decir, es un proceso iterativo.

#### **5.3.1 Entradas del modelo**

Para el caso en estudio se eligió el modelo de rendimiento *CSP parabolic trough (physical)* y el modelo financiero *PPA single owner*, aunque este último solo se utilizó como referencia para la estimación de costos.

Las entradas para este modelo de rendimiento están organizadas en siete páginas, las que incluyen datos sobre ubicación, recurso solar y condiciones meteorológicas, características del colector y propiedades del fluido térmico, capacidad de planta deseada, ciclo de potencia y sistema de almacenamiento, entre otros. El detalle de las variables de entrada que fueron definidas en este modelo y sus valores predeterminados se muestran en el Anexo D.

### 5.3.1.1 Recurso solar y condiciones meteorológicas

Los datos sobre el recurso solar y condiciones meteorológicas en la zona de estudio deben estar incluidos en un archivo en formato SAM CSV, es decir, un archivo de texto separado por coma que contiene 8.760 filas de datos horarios para un año. Dado que el lugar de emplazamiento del proyecto en estudio no está incluido en las bibliotecas de SAM, se tuvo que construir este archivo.

Los datos de radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento fueron obtenidos del Explorador Solar [46], proyecto llevado a cabo por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, por encargo del Ministerio de Energía y GIZ, y que hoy es una potente herramienta para la exploración del recurso solar en el país.

El sitio entrega información sobre la radiación solar incidente en cualquier punto del territorio nacional —para el período comprendido entre los años 2004 y 2015— basada en la modelación numérica de la transferencia de la radiación solar en la atmósfera y en datos satelitales de alta resolución. Permite descargar un archivo con los datos promedios horarios para el período mencionado o para un año típico, esto es, construido en base a los datos de 12 meses de años distintos, representativos de las condiciones climáticas del sitio. Además, genera un reporte que incluye tablas y gráficos con un resumen de las características meteorológicas del lugar, información sobre topografía y resultados de la simulación de la generación de un sistema fotovoltaico. Luego, para las coordenadas del relleno sanitario, mostradas en la Tabla 5.4, se obtuvo los datos para un año típico.

**Tabla 5.4.** Coordenadas RSLLC.

<b>Latitud</b>	32,9629°S
<b>Longitud</b>	70,8053°O
<b>Elevación</b>	828 [m]

Los datos de humedad relativa y presión atmosférica se obtuvieron de los reportes de la estación meteorológica con que cuenta la empresa. En el caso de la temperatura ambiente, también fue tomada de esta fuente, ya que los datos podrían ser más realistas que los entregados por el Explorador Solar que los estima a partir de modelos. Otras variables, como temperatura de punto de rocío, dirección del viento y albedo fueron tomadas de un archivo contenido en la biblioteca de SAM para Santiago, año 1987, sin embargo, solo la primera es usada por el modelo. En el Anexo D.2 se detallan los datos que requiere el archivo y los que son usados por el modelo *CSP parabolic trough (physical)*.

En base a lo anterior, se tiene un promedio anual de radiación global horizontal y directa normal de 5,82 [kWh/m<sup>2</sup> · día] y 8,16 [kWh/m<sup>2</sup> · día], respectivamente. Además, se tiene una temperatura ambiente promedio de 15 [°C] y una velocidad del viento de 1,6 [m/s].

### 5.3.1.2 Requerimiento energético

El campo solar debe entregar la energía necesaria para precalentar el lixiviado desde 21,5 [°C] a 55[°C]. El primer valor corresponde a la temperatura promedio del efluente a la salida de los

sedimentadores, mientras que el segundo se definió en base a la temperatura de operación del destilador. El requerimiento energético,  $Q_{CS}$ , se calcula según la Ecuación 5.1:

$$Q_{CS} = m_{lix} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (5.1)$$

donde

- $Q_{CS}$ : requerimiento energético [kJ/día]
- $m_{lix}$ : flujo másico de lixiviado [kg/día]
- $C_{p_{lix}}$ : calor específico del lixiviado [kJ/kg · K]
- $\Delta T$ : gradiente de temperatura [K]

El flujo másico se calcula como el producto entre el flujo volumétrico del efluente a tratar y su densidad. De esta forma, se obtiene un requerimiento energético de 16.979.000 [kJ/día]. Considerando, además, que solo se cuenta con 10 horas de sol al día, la energía que debe entregar por segundo aumenta, obteniéndose un valor de 471,6 [kJ/s] o 0,471 [MW].

Los modelos CSP de SAM calculan la potencia eléctrica inyectada a la red por un campo de colectores solares que entregan energía térmica a un bloque de potencia para la generación de electricidad. Por lo tanto, el requerimiento energético calculado se convirtió a potencia eléctrica, considerando valores de eficiencia típicos de un ciclo de potencia y de un motor convencionales [28]. Para la primera se tomó un valor de 0,38 y para la segunda un valor de 0,98. Con esto, se tiene una potencia eléctrica de salida de 0,175 [MW<sub>e</sub>] que es ingresada como entrada en la página *Power Cycle*.

### 5.3.1.3 Colector Solar

Como referencia para el diseño se tomó el colector Soponova® de Sopogy, tecnología microCSP. Es un colector cilindro parabólico de estructura liviana que presenta, aproximadamente, un tercio del tamaño de uno convencional, ofreciendo, por tanto, un diseño modular. Consta de un sistema de seguimiento del sol en un eje con sistema de control automático y monitoreo personalizado. En la Figura 5.1 se puede apreciar una imagen del colector y en la Tabla 5.5 se muestran sus principales características y propiedades [47].



**Figura 5.1.** Colector Soponova® [48].

**Tabla 5.5.** Especificaciones técnicas colector Soponova®.

<b>REFLECTOR</b>	
<b>Área de apertura</b>	5,21 [m <sup>2</sup> ]
<b>Ancho de apertura</b>	1,65 [m]
<b>Largo de la estructura</b>	3,657 [m]
<b>Reflectancia del espejo</b>	0,91
<b>RECEPTOR</b>	
<b>Diámetro interno tubo absorbedor</b>	0,02326 [m]
<b>Diámetro externo tubo absorbedor</b>	0,0254 [m]
<b>Diámetro interno cubierta de vidrio</b>	0,051 [m]
<b>Diámetro externo cubierta de vidrio</b>	0,055 [m]
<b>Absorbancia absorbedor</b>	0,95
<b>Emisividad absorbedor</b>	0,207
<b>Absorbancia cubierta</b>	0,04
<b>Emisividad cubierta</b>	0,86
<b>Transmisividad</b>	0,91

#### 5.3.1.4 Fluido térmico

Como fluido térmico se considera Xceltherm® 600, un aceite mineral blanco de tipo parafínico que soporta temperaturas de hasta 315 [°C]. Se escogió, debido a que es usado en varios de los proyectos microCSP existentes [49]. Además, si se compara con el agua, para una misma presión puede trabajar a mayores temperaturas sin cambio de fase. Este fluido no está incluido en las bibliotecas de SAM, por lo que se usó la opción *User-defined* y se ingresaron sus propiedades para distintas temperaturas.

#### 5.3.1.5 Punto de diseño

Para el cálculo del área del campo solar es necesario definir un punto de diseño. Para esto se requieren tres variables de referencia: temperatura ambiente, velocidad del viento e irradiancia normal directa (DNI).

Los valores de referencia de la temperatura ambiente y velocidad del viento son usados para calcular las pérdidas de calor de diseño y no tienen un efecto significativo en los cálculos del dimensionamiento. Valores razonables para estas variables son el promedio anual y en este

modelo no se pueden modificar. El valor de la DNI, por su parte, sí afecta en gran medida estos cálculos. En general, el valor de la DNI de referencia debería ser cercano a la DNI máxima real esperada. Usar un valor muy bajo significa una excesiva pérdida de energía, es decir, se sobredimensiona el sistema. Por otro lado, si se usa un valor muy alto, el sistema trabajará bajo su capacidad nominal la mayor parte del tiempo.

Usualmente, se utiliza la irradiancia normal directa correspondiente al mediodía solar del solsticio de verano. En este caso, entonces, se usa el valor para el día 21 de diciembre del año típico: 1.060 [W/m<sup>2</sup>]. También se sugiere usar el máximo valor de la DNI ajustada por la coseno eficiencia, obtenido de los gráficos que genera SAM. De ambas formas, los resultados son similares. En la Tabla 5.6 se resumen las variables en el punto de diseño.

**Tabla 5.6.** Variables en el punto de diseño.

<b>Temperatura ambiente</b>	<b>15 [°C]</b>
<b>Velocidad del viento</b>	<b>1,6 [m/s]</b>
<b>Irradiancia normal directa (DNI)</b>	<b>1.060 [W/m<sup>2</sup> ]</b>

Finalmente, se definió una temperatura de entrada igual a 93 [°C] y una temperatura de salida de 176 [°C], esto en base a la experiencia de proyectos existentes que usan la misma tecnología y fluido. En este caso no se tiene sistema de almacenamiento térmico, por lo que las horas de plena carga se definen igual a cero en la página *Thermal Storage*.

Al revisar los datos que SAM calcula, se tiene una salida térmica levemente inferior a la deseada, por lo que el valor de la salida eléctrica se ajusta a 0,179 [MW<sub>e</sub>]. De esta manera, el área de apertura requerida total es de 688 [m<sup>2</sup>] y, dado el espacio entre colectores, piping, equipos auxiliares, etc. se obtiene un área total de terreno igual a 0,17 hectáreas. Estos resultados, junto a otros valores calculados por SAM, se presentan en la Tabla 5.7.

**Tabla 5.7.** Resultados dimensionamiento campo solar.

<b>Eficiencia total</b>	<b>0,653</b>
<b>Área de apertura requerida</b>	<b>672 [m<sup>2</sup>]</b>
<b>N° de colectores</b>	<b>132</b>
<b>Área de apertura total</b>	<b>688 [m<sup>2</sup>]</b>
<b>Salida térmica del sistema</b>	<b>0,471 [MW]</b>
<b>Área total</b>	<b>1.740 [m<sup>2</sup>]</b>

Además, SAM entrega gráficos con datos horarios de algunas variables. En la Figura 5.2 se muestra la potencia térmica generada por el campo solar y en la Figura 5.3 una comparación entre la potencia incidente, absorbida y generada.

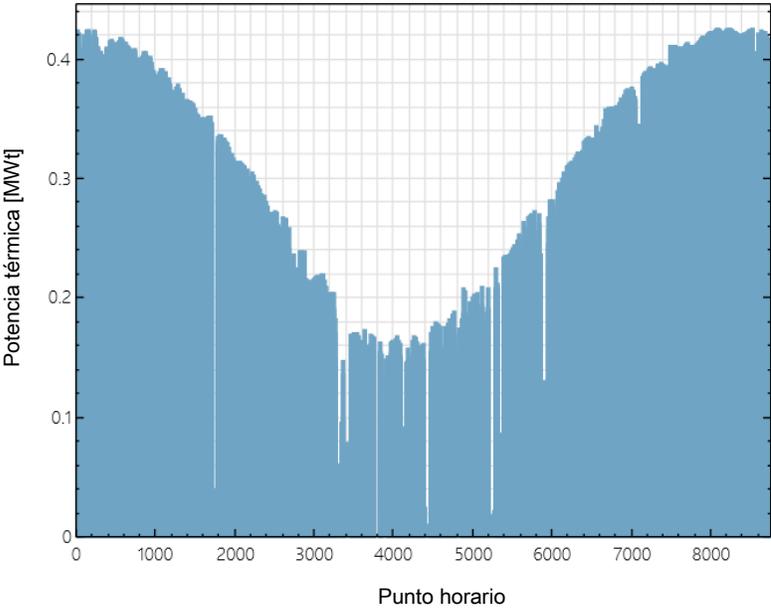


Figura 5.2. Potencia térmica generada por el campo solar.

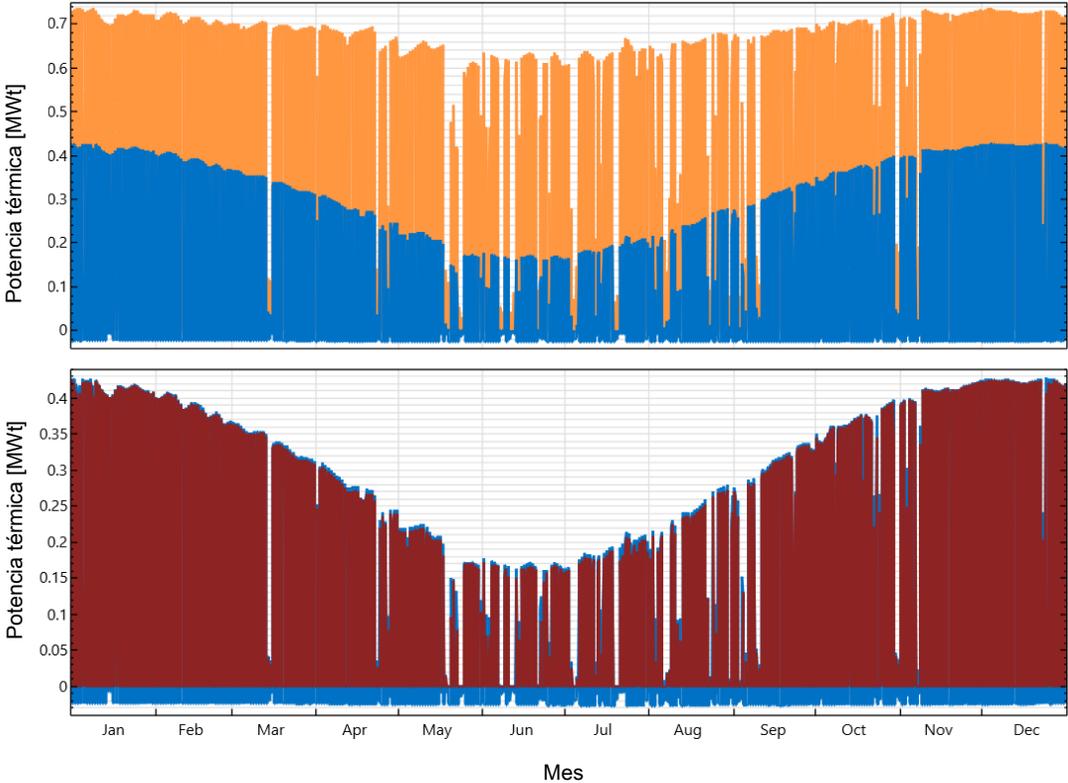


Figura 5.3. Comparación entre potencia térmica incidente, absorbida y producida. En color naranja se muestra la potencia incidente, en azul la absorbida y en burdeos la generada.

## 5.4 Intercambiador de calor

Como se describió en el Capítulo 4, se seleccionó un intercambiador de calor de tubos concéntricos que permita la transferencia de calor desde el fluido térmico hacia el lixiviado. En particular, se toma como referencia el modelo SACOME TF20® que ha sido utilizado en diversas aplicaciones que involucran distintos tipos de corrientes, entre ellas, aguas residuales y lodos. Además, el tubo interior presenta corrugación que reduce el ensuciamiento inherente a este tipo de corrientes y aumenta la eficiencia térmica [50]. En la Figura 5.4 se muestra una imagen de este intercambiador y en la Tabla 5.8 se listan sus especificaciones técnicas.



Figura 5.4. Intercambiador de calor SACOME TF20® [50].

Tabla 5.8. Especificaciones técnicas intercambiador de calor SACOME TF20® [51].

<b>Material</b>	Acero inoxidable 316L
<b>Diámetro interno, <math>D_i</math></b>	0,05 [m]
<b>Diámetro externo, <math>D_o</math></b>	0,052 [m]
<b>Diámetro carcasa</b>	0,1016 [m]

La transferencia de calor en un intercambiador puede expresarse de una manera análoga a la ley de Newton de enfriamiento, según la Ecuación 5.2

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_m \quad (5.2)$$

donde  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor,  $A_s$  es el área de transferencia de calor y  $\Delta T_m$  es una diferencia promedio de temperatura apropiada entre los dos fluidos [43].

Usualmente, la operación de los intercambiadores de calor suele considerarse en estado estacionario, por ende, el flujo másico de cada fluido permanece constante y la temperatura y velocidad se mantienen para cualquier entrada o salida. Asimismo, en un intervalo dado de temperaturas, se considera que el calor específico es constante en algún valor promedio. Por

último, se supone que la superficie exterior del intercambiador está perfectamente aislada, de modo que no se tiene pérdidas de calor hacia el medio circundante.

Bajo estos supuestos y, de acuerdo a la primera ley de la termodinámica, se tiene que la energía que cede el fluido caliente es igual a la que absorbe el fluido frío

$$\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot C_{ph} \cdot (T_{hin} - T_{hout}) = \dot{m}_c \cdot C_{pc} \cdot (T_{cout} - T_{cin}) \quad (5.3)$$

En la Ecuación 5.3 el subíndice  $h$  hace referencia al fluido caliente, en este caso el fluido térmico, mientras que el subíndice  $c$  se refiere al fluido frío.

El coeficiente global de transferencia de calor puede determinarse a partir de la siguiente ecuación

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{D_o}{D_i}\right) \cdot \left(\frac{1}{h_i}\right) + R_{pared} + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \quad (5.4)$$

Donde  $h_i$  y  $h_o$  son los coeficientes de transferencia de calor por convección interno y externo, respectivamente, y  $R_{pared}$  es la resistencia térmica de la pared. Así, el denominador de la Ecuación 5.4 representa la resistencia térmica total. El subíndice que acompaña al coeficiente global indica que su cálculo se basa en el área externa de transferencia de calor [17,43].

El rendimiento de los intercambiadores suele deteriorarse con el paso del tiempo, como resultado de la acumulación de depósitos sobre las superficies de los tubos. La capa de depósitos representa una resistencia adicional para la transferencia de calor y hace que su razón disminuya. El efecto neto de este fenómeno sobre la transferencia de calor se representa por un factor de incrustación  $R_f$ , el cual es una medida de la resistencia térmica introducida por la incrustación, y debe considerarse en el diseño.

La relación del coeficiente global de transferencia de calor dada con anterioridad es válida para superficies limpias, por lo que es necesario modificarla para tomar en cuenta los efectos de dicho fenómeno sobre las superficies interior y exterior. Con esto, el coeficiente global queda

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{D_o}{D_i}\right) \cdot (R_{fi}) + \left(\frac{D_o}{D_i}\right) \cdot \left(\frac{1}{h_i}\right) + R_{pared} + \left(\frac{1}{h_o}\right) + (R_{fo})} \quad (5.5)$$

Donde  $R_{fi}$  y  $R_{fo}$  son los factores de incrustación en la superficie interna y externa, respectivamente.

La diferencia de temperatura entre los fluidos caliente y frío varía a lo largo del intercambiador, así, la forma apropiada del gradiente de temperatura en la Ecuación 5.2 tiene naturaleza logarítmica

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (5.6)$$

En este caso  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$  representan la diferencia de temperatura entre los dos fluidos en ambos extremos del intercambiador. No existe diferencia con respecto a cuál de los extremos de éste se designe como la entrada o la salida [43].

#### 5.4.1 Coeficiente global de transferencia de calor

Como se mencionó, el coeficiente global de transferencia de calor puede determinarse a partir de los coeficientes de transferencia de calor individuales, los que a su vez pueden obtenerse en base a los números adimensionales de *Nusselt*, *Prandtl* y *Reynolds*. El detalle del cálculo de estos coeficientes se muestra en el Anexo E.

En cuanto a los factores de incrustación —involucrados también en el cálculo— se tomó como referencia, para el lado del lixiviado, el correspondiente a agua de mar sobre 50 [°C]; para el lado del fluido térmico se consideró el de un fluido de transferencia de calor industrial orgánico [43,52].

Usando las propiedades de los fluidos de las Tablas 5.2 y 5.3 e imponiendo las condiciones de operación en las ecuaciones correspondientes se puede calcular  $U_o$ . Los resultados obtenidos para los coeficientes individuales y para  $U_o$  se presentan en la Tabla 5.9.

**Tabla 5.9.** Resultados coeficientes de transferencia de calor.

$h_i$	6.155 [W/m <sup>2</sup> · K]
$h_o$	332 [W/m <sup>2</sup> · K]
$R_{fi}$	0,0002 [m <sup>2</sup> · K/W]
$R_{fo}$	0,000352 [m <sup>2</sup> · K/W]
$R_{pared}$	1,16 · 10 <sup>-4</sup> [m <sup>2</sup> · K/W]
<b>Coeficiente global de transferencia de calor, <math>U_o</math></b>	<b><math>U_o = 259</math> [W/m<sup>2</sup> · K]</b>

#### 5.4.2 Dimensiones del intercambiador

Finalmente, a partir de la Ecuación 5.2 es posible calcular el área del intercambiador.  $\dot{Q}$  en dicha ecuación corresponde al requerimiento energético calculado para el campo solar, considerando, igualmente, 10 horas de operación (dadas las horas de sol). A partir de la Ecuación 5.3 se obtiene el flujo másico del fluido térmico,  $\dot{m}_h$ , y  $\Delta T_m$  se calcula a partir de las temperaturas de entrada y salida que fueron definidas. Así, se calcula el área y con los diámetros de los tubos se obtiene el largo del intercambiador. El detalle del cálculo se puede ver en Anexo E. Los resultados se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Dimensiones del intercambiador de calor.

Magnitud	Valor
Área	19,2 [m <sup>2</sup> ]
Largo	118 [m]

## 5.5 Destilador solar

El lixiviado —precalentado en el intercambiador de calor— ingresa al destilador, donde se espera evaporar parte del agua contenida en esta corriente y recuperarla como condensado.

Para determinar el área del destilador se plantean los balances de energía en el sistema. Los principales mecanismos de transferencia involucrados se muestran en la Figura 5.5.

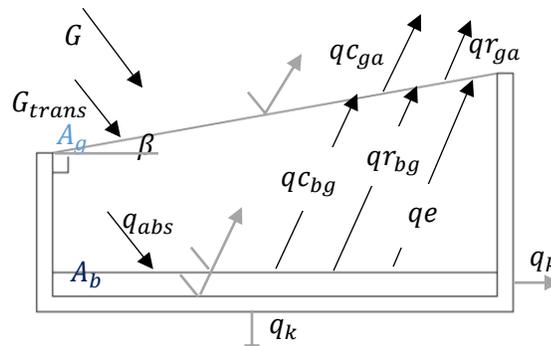


Figura 5.5. Principales mecanismos de transferencia de energía en el destilador.

El balance de energía en el lixiviado que está contenido en la bandeja (y en la bandeja en sí), por unidad de área puede escribirse como

$$G \cdot \tau_g \cdot \alpha = q_e + q_{r_{bg}} + q_{c_{bg}} + q_k + m_b \cdot Cp_b \cdot \frac{dT_b}{dt} \quad (5.7)$$

donde los subíndices *e*, *r*, *c* y *k* representan evaporación-condensación, radiación, convección y conducción, respectivamente. El subíndice *b* se refiere a la bandeja y *g* se refiere a la cubierta. De esta forma, se tiene

- $G \cdot \tau_g \cdot \alpha$ : radiación transmitida por la cubierta y absorbida por la bandeja
- $q_e$ : transferencia de energía por evaporación-condensación
- $q_{r_{bg}}$ : transferencia de energía por radiación entre la superficie del lixiviado y la cubierta
- $q_{c_{bg}}$ : transferencia de energía por convección entre la superficie del lixiviado y la cubierta
- $q_k$ : transferencia de energía por conducción entre la bandeja y los alrededores
- $m_b \cdot Cp_b \cdot \frac{dT_b}{dt}$ : energía almacenada en el sistema

Por otro lado, el balance de energía en la cubierta por unidad de área, despreciando su capacitancia y la absorción de radiación en ella, puede ser escrito como

$$q_e + q_{r_{bg}} + q_{c_{bg}} = q_{c_{ga}} + q_{r_{ga}} \quad (5.8)$$

donde el subíndice *a* hace referencia al ambiente. Así, los términos involucrados en este balance son

- $q_{c_{ga}}$ : transferencia de energía por convección entre la cubierta y el ambiente
- $q_{r_{ga}}$ : transferencia de energía por radiación entre la cubierta y el ambiente

Los términos de transferencia de calor interna, es decir, entre la superficie del lixiviado y la cubierta pueden ser estimados mediante las relaciones propuestas por Dunkle en 1961 [18]. Para la transferencia de calor por radiación se considera que la cubierta usualmente es de vidrio y que durante la operación del destilador una delgada lámina de condensado se forma en su superficie interna. Por lo tanto, Dunkle sugiere que este término sea escrito según la Ecuación 5.9

$$q_{r_{bg}} = 0,9 \cdot \sigma \cdot (T_b^4 - T_g^4) \quad (5.9)$$

donde  $\sigma$  es la constante de *Stefan-Boltzmann*. Las temperaturas se expresan en kelvin.

Por otro lado, para la transferencia de calor por convección sugiere la expresión dada en la Ecuación 5.10, con  $h'_c$ , coeficiente de transferencia de calor, dado por la Ecuación 5.11. Estas expresiones consideran los efectos de flotación, debidos a la transferencia simultánea de masa y energía.

$$q_{c_{bg}} = h'_c (T_b - T_g) \quad (5.10)$$

$$h'_c = 0,884 \cdot \left[ (T_b - T_g) + \left( \frac{p_{wb} - p_{wg}}{2016 - p_{wb}} \right) T_b \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.11)$$

$p_{wb}$  y  $p_{wg}$  en la Ecuación 5.11 son las presiones de vapor de agua en milímetros de mercurio del lixiviado a temperatura  $T_b$  y del agua a la temperatura de la cubierta  $T_g$ , ambas temperaturas expresadas en kelvin.

Por analogía entre transferencia de masa y calor, la tasa de transferencia de masa puede escribirse según la Ecuación 5.12

$$m_D = 9,15 \cdot 10^{-7} \cdot h'_c \cdot (p_{wb} - p_{wg}) \quad (5.12)$$

Luego, la transferencia de calor por evaporación-condensación es

$$q_e = 9,15 \cdot 10^{-7} \cdot h'_c \cdot (p_{wb} - p_{wg}) \cdot h_{fg} \quad (5.13)$$

$m_D$  es la tasa de transferencia de masa en  $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$  y  $h_{fg}$  es el calor latente de vaporización del lixiviado en  $[\text{J}/\text{kg}]$ .

Los términos de transferencia de calor desde la cubierta al ambiente son formulados según las Ecuaciones 5.14 y 5.15.

$$q_{c_{ga}} = h_{ca} \cdot (T_g - T_a) \quad (5.14)$$

$$q_{r_{ga}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_g^4 - T_s^4) \quad (5.15)$$

En la Ecuación 5.14  $h_{ca}$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección al ambiente y  $T_a$  es la temperatura ambiente. En la Ecuación 5.15  $\varepsilon$  es la emisividad de la cubierta y  $T_s$  es la temperatura del cielo equivalente.

Si el destilador cuenta con un efectivo sistema de aislamiento bajo la bandeja y en sus paredes laterales, las pérdidas de calor por conducción ( $q_k$ ) pueden despreciarse.

La dirección y magnitud de la radiación solar que incide en el destilador están continuamente cambiando, al igual que las demás condiciones ambientales, por lo que a partir del sistema de ecuaciones dado por los balances de energía en la bandeja y en la cubierta (Ecuaciones 5.7 y 5.8), se estima la temperatura del lixiviado y de la cubierta en función del tiempo; esto para un área dada. Como lo que en este caso se busca, precisamente, es el cálculo de esta última, se fijó  $T_b$  y se calculó  $T_g$  y el área de la bandeja.

Los términos de transferencia de calor entre la bandeja y la cubierta y entre ésta y el ambiente están dados por unidad de área, es decir, se expresan en  $[W/m^2]$ . Como la cubierta tiene un ángulo de inclinación ( $\beta$ ), se puede determinar una relación entre su área y la de la bandeja, dada por

$$A_b = \cos(\beta) \cdot A_g \quad (5.16)$$

Utilizando esta relación en los balances, las Ecuaciones 5.7 y 5.8 quedan

$$(G \cdot \tau_g \cdot \alpha - q_e - q_{r_{bg}} - q_{c_{bg}}) \cdot A_b = m_b \cdot C p_b \cdot \frac{dT_b}{dt} \quad (5.17)$$

$$(q_e + q_{r_{bg}} + q_{c_{bg}}) \cdot A_b = \frac{A_b}{\cos(\beta)} \cdot (q_{c_{ga}} + q_{r_{ga}}) \quad (5.18)$$

Para efectos de cálculo del área, se fijó  $T_b$  en un valor igual 60  $[^\circ C]$ , ya que para temperaturas de operación mayores la transferencia de calor al ambiente aumenta a tal punto que ya no hay un incremento en la tasa de evaporación, en cambio, aumenta la temperatura del medio circundante [29]. Se probaron distintos valores y esa resultó ser la temperatura con la que se obtenía una mayor tasa de evaporación. Esta temperatura sería alcanzada, pues el intercambiador precalienta el lixiviado a hasta 55  $[^\circ C]$ .

En cuanto a la inclinación, se probaron valores entre 30° y 10°, obteniéndose la mayor producción con una inclinación de 20°.

Como punto de diseño se consideró la radiación global incidente en panel promedio anual (con una inclinación de 20°) entregada por el Explorador Solar.

Con estas condiciones de operación y con los parámetros del destilador se resolvió la Ecuación 5.18, mediante el uso de *Matlab*, para obtener  $T_g$ ; con la cual, a su vez, se calculó los distintos términos involucrados en el balance. Finalmente, con esto y a partir del balance en la bandeja, se obtiene el área. Asimismo, se calculó la eficiencia del destilador para el punto de diseño, definida como la razón entre la tasa de transferencia de calor por evaporación-condensación y la irradiancia, obteniéndose un valor sobre 60%. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 5.11 y los resultados obtenidos en la Tabla 5.12. Finalmente, las correlaciones usadas para el cálculo de la temperatura del cielo equivalente, presión de vapor de agua y coeficiente de transferencia de calor por convección al ambiente se pueden ver en el Anexo F.

**Tabla 5.11.** Parámetros utilizados en los cálculos.

<b>Temperatura ambiente, <math>T_a</math></b>	15 [°C]
<b>Humedad relativa, <math>RH</math></b>	55 [%]
<b>Velocidad del viento, <math>v</math></b>	1,6 [m/s]
<b>Emisividad del vidrio, <math>\varepsilon</math></b>	0,88 [18]
<b>Calor latente de vaporización, <math>h_{fg}</math></b>	2.299 [kJ/kg]
<b>Irradiancia, <math>G</math></b>	638 [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Transmisividad del vidrio*, <math>\tau_g</math></b>	0,9 [53]
<b>Absorbancia de la bandeja*, <math>\alpha</math></b>	0,95 [53]

\*Si bien la transmisividad y la absorbancia varían con el ángulo de incidencia, para ángulos sobre 60° permanece prácticamente constante. El ángulo de incidencia en el destilador, durante las horas de sol, varía entre 29° y 53°, aproximadamente, por lo que no se considera ninguna variación en estos parámetros.

**Tabla 5.12.** Resultados dimensionamiento destilador.

<b>Temperatura cubierta, <math>T_g</math></b>	46,6 [°C]
<b><math>q_e</math></b>	399 [W/m <sup>2</sup> ]
<b><math>qc_{bg}</math></b>	36 [W/m <sup>2</sup> ]
<b><math>qr_{bg}</math></b>	96 [W/m <sup>2</sup> ]
<b><math>qc_{ga}^*</math></b>	256 [W/m <sup>2</sup> ]
<b><math>qr_{ga}^*</math></b>	275 [W/m <sup>2</sup> ]
<b><math>m_D</math></b>	0,000173 [kg/m <sup>2</sup> · s] 27,7 [m <sup>3</sup> /día]**
<b>Área cubierta, <math>A_g</math></b>	4.740 [m <sup>2</sup> ]
<b>Área bandeja, <math>A_b</math></b>	<b>4.471[m<sup>2</sup>]</b>

\*Estos valores ya consideran el factor asociado a la relación de las áreas.

\*\*Considerando 10 horas de operación al día.

## 6 Evaluación económica

La evaluación de la alternativa de tratamiento propuesta contempla también un análisis desde el punto de vista económico. En este capítulo se presenta la estimación de costos —organizados en costos de inversión y costos de operación— y beneficios que involucra el proyecto, los que fueron obtenidos a partir de bibliografía y de datos proporcionados por la empresa, principalmente. Este análisis no considera el costo del tratamiento actual, al que se sumaría el de esta nueva etapa, y tampoco una comparación con otras alternativas de “tratamiento terciario”.

### 6.1 Costos de inversión

Esta categoría de costos corresponde al capital que se requiere para la mayor parte de las actividades en la fase de adquisición, es decir, compra e instalación de la planta; además del dinero necesario para que opere durante el primer mes, denominado capital de trabajo. Aparte de los costos asociados a los equipos del proceso y su instalación, propiamente tal, se incluyen ítems como piping, instrumentación y control, preparación del terreno, entre otros; todos estos son los llamados costos directos. Asimismo, se consideran aquellos que no son fácilmente identificables con un equipo específico, como supervisión, seguros, ingeniería, etc. Estos últimos corresponden a los costos indirectos. A continuación se presentan los costos de inversión estimados para cada componente del sistema: campo solar, intercambiador de calor y destilador.

#### 6.1.1 Campo solar

La estimación de los costos de inversión asociados al campo solar se hizo en base a los datos que entrega el programa SAM. Los valores predeterminados incluidos en los modelos financieros corresponden a una estimación de costos realizada por el NREL, basada en estudios de costos, revisión de literatura e información compartida por desarrolladores y partícipes de la industria. Son representativos para Estados Unidos y actualizados al momento del lanzamiento de cada nueva versión de SAM, en este caso corresponden al año 2016. En particular, para el modelo *CSP parabolic trough (physical)* toma como referencia una planta de colectores *SkyTrough* de 100 [MWe] de capacidad con 6 horas de almacenamiento y un área de apertura de aproximadamente 100 hectáreas.

SAM organiza los costos de inversión en costos directos e indirectos, según se muestra en la Tabla 6.1 para el caso de estudio. Por supuesto, no se consideran costos asociados al almacenamiento ni al ciclo de potencia, ya que no aplican. El detalle de los costos incluidos en cada categoría se presenta en el Anexo G.1.

**Tabla 6.1.** Costos de inversión campo solar.

<b>Costos de inversión directos</b>		
	<b>Costo por metro cuadrado de área de apertura [USD/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Total [USD]*</b>
<b>Preparación del sitio</b>	30	20.632
<b>Campo solar</b>	170	116.912
<b>Sistema fluido térmico</b>	70	48.140
<b>Subtotal</b>		185.684
<b>Contingencias</b>	7% del subtotal	12.998
<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>		<b>198.682</b>
<b>Costos de inversión indirectos</b>		
<b>EPC** y costos del dueño</b>	11% costo directo	21.855
<b>Costo total del terreno***</b>		-
<b>COSTO INDIRECTO TOTAL</b>		21.855
<b>COSTO TOTAL INSTALADO</b>		<b>220.537</b>

\*Área de apertura=687,7 [m<sup>2</sup>]

\*\*Ingeniería, aprovisionamiento y construcción.

\*\*\*No se considera en este análisis el costo del terreno

### 6.1.2 Intercambiador de calor

A partir del costo de compra de los equipos es posible estimar el costo de los ítems adicionales que se mencionaron previamente, asumiendo cada uno como un porcentaje de la inversión de capital fijo total, como se muestra en la Tabla 6.2 [56]. Los porcentajes que se presentan resumen una distribución típica de costos observada para nuevas plantas o extensión de alguna existente, pudiendo aplicarse también a equipos.

La estimación del costo de compra del intercambiador se hizo a partir de una correlación obtenida de bibliografía, la que entrega el precio FOB (*free on board*), es decir, no incluye costos de transporte ni instalación [57]. Por otro lado, el precio de compra obtenido corresponde a un año en particular, por lo que debe actualizarse para el presente año; esto se hace mediante el uso de índices [56]. En este caso se utilizó el índice CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*) con lo que se obtuvo un costo de compra actualizado de 8.726 [USD]. Luego, en base a este precio y

aplicando los porcentajes de la Tabla 6.2, se obtiene que el costo de inversión total asociado al intercambiador es de 25.305 [\$USD]. El detalle del cálculo de muestra en el Anexo G.2.

**Tabla 6.2.** Factores para estimar los costos de inversión.

Ítem	Porcentaje del costo de inversión total [%]
<b>Costos directos</b>	
<b>Compra de equipos</b>	15-40
<b>Instalación de equipos</b>	6-14
<b>Instrumentación y control</b>	2-8
<b>Piping</b>	3-20
<b>Servicios eléctricos</b>	2-10
<b>Edificaciones</b>	3-18
<b>Mejoras al sitio</b>	2-5
<b>Instalaciones de servicio</b>	8-20
<b>Terreno</b>	1-2
<b>Costos indirectos</b>	
<b>Ingeniería y supervisión</b>	4-21
<b>Gastos de construcción</b>	4-16
<b>Pago contratistas</b>	2-6
<b>Contingencias</b>	5-15

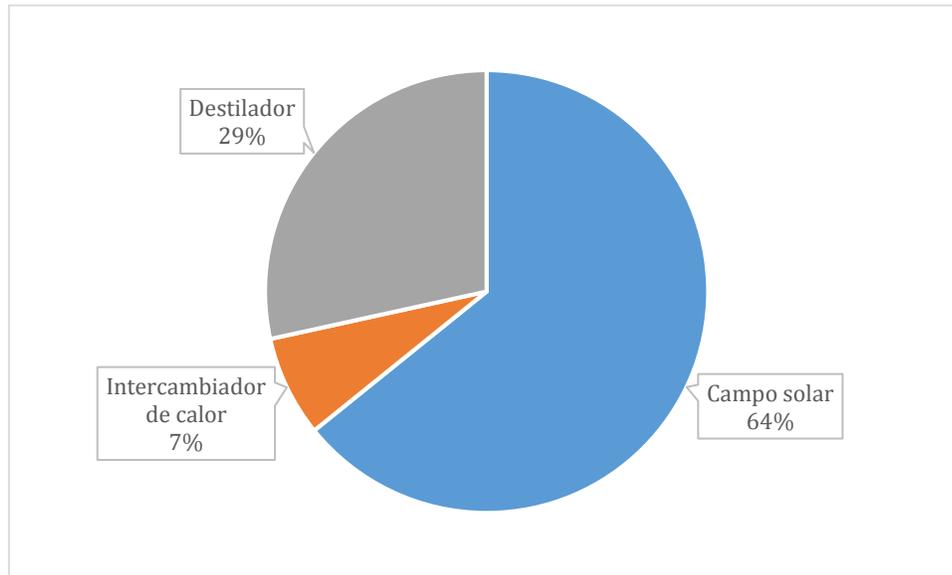
### 6.1.3 Destilador

Para la estimación de la inversión asociada al destilador se consideró el costo de construcción de una piscina impermeabilizada y revestida con una geomembrana de HDPE, similar a las piscinas de acumulación existentes en el relleno. Además, incluye el costo de una cubierta de vidrio con bajo contenido de hierro, altamente transparente. En la Tabla 6.3 se muestra el costo asociado a ambos componentes, así como el costo de inversión total para el destilador. Cabe destacar que no se contabilizó la instalación de la cubierta. El detalle de los supuestos y costos utilizados se muestra en el Anexo G.3.

**Tabla 6.3.** Costo de inversión destilador solar.

Ítem	Costo [\$USD]
<b>Piscina (bandeja)</b>	4.336
<b>Cubierta de vidrio</b>	93.373
<b>Total</b>	<b>97.709</b>

Finalmente, se tiene un costo de inversión total del orden de 344.000 [USD]. En el gráfico de la Figura 6.1 se muestra cómo se distribuye este costo entre los distintos componentes del sistema.



**Figura 6.1.** Distribución de costos de inversión.

En cuanto al capital de trabajo, se considerará como el monto equivalente a la suma de los costos operacionales de los dos primeros meses.

## 6.2 Costos de operación

Estos corresponden a aquellos que demanda la operación de la planta día a día y se pueden clasificar, según su comportamiento, en fijos y variables. Los primeros prácticamente no varían con el nivel de producción, dentro de un rango de capacidad y plazo determinados. Consideran ítems como seguros, impuestos, gastos de administración general, intereses, etc. Los segundos, en cambio, dependen del nivel de producción, como los costos de materias primas e insumos, por ejemplo.

Para este caso particular, se tomó como referencia los costos de operación por metro cúbico de la planta de tratamiento actual, descontando aquellos asociados a la recirculación del efluente, a la mano de obra y a la energía eléctrica usada en la aireación. Es decir, considera costos de mantención y reparación de piscinas y equipos, análisis de laboratorio, insumos, entre otros. A estos se suman los salarios de dos operarios (mano de obra asociada solo al sistema propuesto) y el consumo de agua para el lavado de los espejos del campo solar. Teniendo en cuenta el volumen a tratar, se obtiene un costo de operación anual de alrededor de 64.600 [USD], aproximadamente. El detalle se muestra en el Anexo G.4.

## 6.3 Beneficios

En este caso no se consideran ingresos, pero sí ahorros de costos, como son el asociado a la recirculación de efluente mediante camiones y, si es que el condensado obtenido en el destilador cumple con la norma de calidad de agua para riego, se tendría también un ahorro asociado a la compra de agua potable para este uso. En promedio, diariamente se utilizan 70 [m<sup>3</sup>] de agua

potable para riego de caminos no impermeabilizados y de vegetación, la que llega al relleno en camiones aljibes desde localidades cercanas. Luego, con el agua obtenida del destilador podría cubrirse alrededor de un 40% de esta demanda. En la Tabla 6.4 se resumen estos ahorros.

**Tabla 6.4.** Ahorros de costos asociados a la alternativa propuesta.

<b>Ítem</b>	<b>Ahorro [\$USD/año]</b>
<b>Ahorro costo agua potable para riego</b>	34.652
<b>Ahorro costo recirculación del efluente*</b>	29.632
<b>Total</b>	<b>64.284</b>

\*Para el cálculo se considera el mismo volumen que se usaría para riego: 27.700 [m<sup>3</sup>/día].

Finalmente, se elaboró el flujo de caja del proyecto, con un horizonte de evaluación de 15 años y con crédito a 10 años, con cuota fija y tasa de interés anual de 6%, correspondiente a un 70% del costo de inversión fijo. Los supuestos y el detalle del flujo de caja se muestran en el Anexo H. Cabe destacar que el escenario escogido es arbitrario, pero permite observar el comportamiento de los flujos, en forma general. Excepto para el año 1 y año 15 (asociados a la recuperación del IVA de la inversión y al valor residual de los activos, respectivamente) no se tienen flujos positivos, y no se recupera la inversión en el período analizado, por lo que en la evaluación deben incluirse otros criterios. Esto es discutido más adelante.

## 7 Evaluación ambiental

La actividad humana y el creciente desarrollo económico han llevado al deterioro del medio ambiente y al agotamiento de los recursos naturales. La necesidad de evitar estos efectos y asegurar beneficios sostenidos en el tiempo, han llevado a que hoy en día la evaluación de un proyecto desde el punto de vista ambiental sea tan importante en la toma de decisiones como lo son la evaluación técnica y económica. La evaluación ambiental es un análisis técnico que permite identificar y evaluar los potenciales impactos negativos de una actividad de desarrollo en el medio ambiente, así como también identificar y aumentar los positivos. Involucra, además, la propuesta de medidas de mitigación y de monitoreo [63].

En este capítulo se identifican ciertos potenciales impactos positivos y negativos asociados directamente a las etapas que involucra la alternativa de tratamiento propuesta, así como también aquellos potenciales impactos negativos del actual sistema de gestión del efluente que podrían reducirse con su implementación.

La alternativa propuesta busca la obtención de un residuo sólido o semi-sólido, altamente concentrado y cuyo manejo sea menos complejo y más seguro respecto a la situación actual, en que un importante volumen de efluente es recirculado al relleno por medio de camiones que lo descargan en pozos construidos para este propósito. La recirculación del lixiviado reporta ciertos beneficios como son la estabilización de estas corrientes producto de la actividad biológica y de procesos químicos y físicos que ocurren en el relleno, y el consecuente aumento de la producción de biogás. Sin embargo, también existen potenciales problemas asociados a este método de manejo.

Tanto la masa de residuos como el material de cobertura del relleno son capaces de retener agua. El volumen de agua que pueden retener, sometida a la acción de la gravedad, se denomina capacidad de campo. El contenido de agua que supere esta propiedad de los residuos se traducirá en la potencial formación de corrientes de lixiviado. Así, el volumen de lixiviado que se genera tiene relación directa con las corrientes externas que entran al relleno [7].

Teniendo en cuenta lo anterior, el nivel de recirculación podría ser tal que la capacidad de campo se vea superada. Luego, un potencial impacto de esta práctica es el aumento en el volumen de lixiviado que se genera —con todos los problemas asociados a estas corrientes— así como un cambio en su composición. De acuerdo a datos de la empresa, efectivamente, se ha observado un aumento en la generación de lixiviados a lo largo de los años y, asimismo, ha aumentado la concentración de algunos componentes. Si bien esto puede deberse a otros factores, el efecto de la recirculación debe ser considerado.

Por otro lado, al recircular grandes volúmenes de lixiviado la capacidad del sistema de recolección podría verse superada; a la vez que estos líquidos podrían aflorar en la superficie y fluir a través de los taludes, llegando incluso a zonas no impermeabilizadas, contaminando el entorno y siendo un riesgo para la salud humana. Además, podría afectar la estabilidad de la masa de residuos y, si no es distribuido homogéneamente en ella, podría llevar a un asentamiento diferencial.

Por lo tanto, la alternativa propuesta, al disponer en el relleno un residuo final con un contenido de agua considerablemente menor que las corrientes que se recirculan actualmente, tiene el potencial impacto positivo de disminuir el volumen de lixiviados que se genera. Esto considerando que las principales entradas externas de agua a la masa de residuos son las corrientes de recirculación y las precipitaciones atmosféricas; estas últimas ocurren pocas veces en el año, mientras que las primeras se tienen permanentemente. Al mismo tiempo, se reduce su capacidad de migración, evitando contaminación de aguas o suelos. Por otra parte, la recirculación involucra el uso de camiones, cuya operación tiene asociado el consumo de energía no renovable y la emisión de gases de efecto invernadero.

El sistema propuesto, además, supone el uso de una energía renovable y libre de emisiones contaminantes: la energía solar. En cuanto a la forma en que ésta es captada, no hay impactos asociados a contaminación del aire, suelo o cuerpos de agua. No obstante, se debe considerar el consumo de agua en el lavado de los espejos, ya que ésta es un recurso escaso, y en particular lo es en la zona de emplazamiento del relleno. Por lo tanto, se debe procurar minimizar el volumen utilizado para este fin. Asimismo, es necesario mantener ciertos resguardos en el manejo del fluido térmico; aunque estos fluyen en un circuito cerrado, por lo que las fugas deberían ser insignificantes. Además, su impacto al medio ambiente es considerablemente bajo, ya que en la mayoría de los casos los aceites que se usan son biodegradables [64].

Por otro lado, mediante esta alternativa se obtendría una corriente líquida con menor carga contaminante que el efluente actual, la que incluso podría tener la calidad que estipula la norma para su uso en riego. Si bien no se ha hecho un análisis sobre los gases que pudiesen condensar junto con el vapor de agua y salir en esta corriente, se espera que la mayor parte de los contaminantes, como metales pesados y sales, queden en el residuo sólido o semi-sólido [21]. Evidentemente, esto requiere mayor estudio y cualquier contaminante que supere los límites permitidos para un uso dado debe ser removido.

Actualmente, parte del consumo de agua potable del relleno es usado en riego de caminos no impermeabilizados y riego de vegetación, esto último en el marco del desarrollo del plan de forestación que busca mantener las especies endémicas que han sido afectadas por el proyecto. Esta agua es traída en camiones aljibes desde tres localidades; la más cercana se ubica a 22 [km], mientras que la más lejana está a 78 [km], aproximadamente. Luego, el transporte del agua hacia el relleno tiene asociado un impacto ambiental que guarda relación con las emisiones de gases de efecto invernadero. Cabe destacar que en Chile alrededor de un 30% del total de las emisiones de  $CO_2$  provienen del sector transporte [65].

En vista de lo anterior y de la escasez de agua que existe hoy en día, el poder recuperar este recurso significaría un gran beneficio desde el punto de vista ambiental, pudiendo cubrir alrededor de un 40% del requerimiento de agua para riego (esto de acuerdo a los cálculos para el caso base).

Finalmente, se destaca el gran volumen de lixiviado que se acumula en piscinas, el que también podría reducirse al implementarse esta alternativa. La exposición a la atmósfera de grandes

superficies de este líquido tiene asociados problemas de olores, riesgo de desborde ante eventos de precipitación abundante, además del uso de terreno.

El manejo de estas corrientes siempre significa un riesgo, independiente de la alternativa de tratamiento, por lo que debe hacerse con el debido cuidado para no afectar el medio ambiente ni la salud humana.

## 8 Discusión

La operación de los rellenos sanitarios tiene asociada la generación de corrientes contaminantes, líquidas y gaseosas, que constituyen un importante riesgo para el medio ambiente y la salud humana, por lo que su adecuada gestión es fundamental. El agua que se infiltra a través de la masa de residuos, así como la contenida originalmente en ellos, causa un proceso de lixiviación de materiales biológicos y químicos, dando origen a dichas corrientes líquidas que genéricamente se caracterizan por su alto contenido de materia orgánica, metales pesados, sales minerales, entre otros. Dada su naturaleza compleja, no existe un único tratamiento que permita obtener un efluente que cumpla con las normas asociadas a cada método de disposición final, por lo que siempre se utiliza una combinación de procesos.

En el caso particular del RSLLC el sistema de manejo de lixiviados consta de un tratamiento de carácter biológico, posterior al cual estas corrientes son recirculadas al relleno, usadas en riego de caminos impermeabilizados y/o acumuladas en piscinas de almacenamiento. A lo largo de los años, la generación de lixiviados ha aumentado, al igual que lo ha hecho la concentración de algunos compuestos contenidos en ellos. Esto, junto con el hecho de que el volumen que es recirculado está limitado por la capacidad y disponibilidad de los camiones que lo llevan hasta los pozos destinados para este propósito, ha llevado a un incremento de la acumulación en piscinas. Por lo tanto, si bien hoy se cuenta con un sistema de manejo válido, dentro del marco normativo, no existe reducción de volumen ni recuperación de recursos. Todo lo anterior justifica la búsqueda de una alternativa más sustentable que minimice los riesgos y que genere beneficios sostenidos en el tiempo.

En este contexto, se propone un sistema de secado que permita disponer un residuo sólido o semi-sólido de menor volumen y recuperar una corriente líquida que pudiese tener algún uso como riego, por ejemplo. Además, dada la situación ambiental y energética actual, es fundamental pensar en alternativas más sustentables. En este sentido, una opción atractiva es el uso de la energía solar, considerando, asimismo, que Chile presenta condiciones únicas en cuanto a la disponibilidad del recurso. Así, por ejemplo, Santiago tiene mejores condiciones de radiación que Almería en España, lugar que alberga el principal centro de investigación, desarrollo y ensayos dedicado a las tecnologías de concentración solar en Europa [23]. En general, el uso de cualquier energía limpia y renovable va a tener un menor impacto sobre el medio ambiente que el uso directo o indirecto de combustibles fósiles, sin embargo, el análisis de otras fuentes está fuera del alcance de este trabajo.

En cuanto a los métodos de secado, estos pueden incluir equipos de operación y geometría complejas hasta simples piscinas de evaporación natural. Dentro de los primeros se tienen los que se conocen como secadores propiamente tal, y fueron descartados, debido a que su complejidad y el carácter corrosivo e incrustante del lixiviado ocasionarían serios problemas operacionales, lo que haría inviable esta alternativa desde el punto de vista técnico y económico.

Los procesos de membrana también han demostrado ser un método eficaz en la purificación de las corrientes de lixiviado, en particular la osmosis inversa que puede alcanzar tasas de rechazo sobre el 98%. Sin embargo, esta tecnología presenta algunas desventajas como la rápida

saturación de la membrana que se traduce en una alta frecuencia de lavados, con el consecuente deterioro y disminución de la productividad. A esto se suma el alto consumo de energía eléctrica [66]. Estos problemas se hicieron evidentes cuando se implementó este sistema para el tratamiento de lixiviados en el RSLLC. Destaca, por tanto, la importancia de considerar las características de las corrientes a tratar, la escala de producción, el objetivo de diseño, condiciones ambientales, etc. al momento de diseñar un proceso.

La elección del sistema propuesto se basa en gran parte en la destilación solar de agua de mar que ha sido usada a pequeña y gran escala y que permite el suministro de agua potable en regiones donde solo cuentan con fuentes de agua salobre. Evidentemente, la calidad del condensado obtenido en este caso puede ser menor que la que resulta de la desalinización de agua de mar, debido a la presencia de otro tipo de contaminantes; sin embargo, el fenómeno subyacente es el mismo y se espera que —al menos— sales y metales pesados queden en el concentrado.

La tasa de evaporación (y la producción de destilado) es proporcional a la diferencia de presión de vapor entre la bandeja y la cubierta del destilador, la que a su vez depende de la temperatura de cada superficie. Por esto, se espera que al precalentar el lixiviado antes de ingresar al destilador, aumente la eficiencia del sistema. Esto ya se ha sido demostrado en estudios previos; casos particulares pueden revisarse en el apartado 2.4.1.1.

El diseño de un proceso involucra una serie de decisiones, las que se van tomando constantemente a lo largo de su desarrollo. Una decisión de gran relevancia guarda relación con las distintas etapas que conformarán el proceso; en muchos casos existen diversas opciones disponibles y mediante distintos criterios se debe seleccionar la que resulte más adecuada para las condiciones en que desee aplicarse.

Para la captación de la energía solar se seleccionó un colector cilindro parabólico con sistema de seguimiento en un eje, el que permite alcanzar mayores temperaturas de operación que uno de placa plana. Además, dentro de las tecnologías CSP, ésta es la que ha logrado un mayor desarrollo tecnológico y comercial. Otras tecnologías que fueron revisadas presentan elevadas razones de concentración que se traducen en temperaturas más altas del fluido térmico, sin embargo, aumentan también los requerimientos de precisión del sistema de seguimiento. Se propone el uso de la tecnología microCSP, alternativa de menor tamaño que la cilindro parabólica tradicional. De instalación y puesta en marcha más sencillas, ha sido usada con éxito en proyectos de pequeña escala.

Para la transferencia de calor desde el fluido térmico al lixiviado se seleccionó el intercambiador de calor más sencillo: el de doble tubo. Existen diversos tipos de intercambiadores y su elección debe considerar las características de las corrientes que intervienen, limitaciones de tamaño y peso, la existencia de procesos de cambio de fase, costo, seguridad, etc. En este caso las características del lixiviado son determinantes, por lo que se busca una opción que permita una limpieza y mantención menos dificultosa, dado que se espera la acumulación de depósitos sobre las superficies de los tubos. Se definió una configuración a contraflujo con la que se mantienen mayores gradientes de temperatura, traduciéndose en una menor área. Considerando que se

trata de la transferencia de calor entre dos corrientes líquidas, podría ser que otro tipo de intercambiador logre mayores tasas de transferencia o que presente otras ventajas (tamaño o costo, por ejemplo), pero minimizar los problemas operacionales, en este caso, es primordial. El equipo debe ser de algún material resistente a la corrosión, el que usualmente será costoso [43].

En relación al destilador solar, se considera uno de tipo caseta, convencional, con una bandeja de similares características a las piscinas de acumulación que existen en el relleno, las cuales están revestidas de una geomembrana de HDPE de color negro que favorece la absorción de la energía y que resiste las características del lixiviado.

Se pueden analizar otras configuraciones para precalentar el lixiviado, por ejemplo, la instalación de una tubería por debajo o sobre la bandeja del destilador, sin embargo, la primera opción podría tener algún impacto en la estructura de la bandeja, mientras que la segunda se vería afectada por el ensuciamiento de los tubos.

El caso base se definió a partir de un balance entre el flujo diario de efluente que genera la planta de tratamiento actual y aquel que es recirculado al relleno. Si bien para esto se utilizaron valores promedio, correspondientes a un año específico, igualmente se consideran representativos, de acuerdo a los datos históricos que maneja la empresa. Cabe destacar que existe cierta estacionalidad en la generación de lixiviados, sin embargo, no se considera. Asimismo, para ciertos meses se observa gran dispersión en los flujos, siendo el valor máximo hasta 35 veces superior al mínimo. En el caso de la producción de la planta de tratamiento, existen fluctuaciones, pero no tan marcadas; además, éstas no deberían afectar en gran medida la operación del sistema propuesto, ya que éste está diseñado para tratar un flujo menor al promedio. Es importante notar que se asumió que el volumen que se recircula es el adecuado para la humectación del relleno y para favorecer la producción de biogás, sin embargo, no hay certeza en esto, ya que no se conoce la capacidad de campo.

En los cálculos del dimensionamiento son necesarias algunas propiedades termofísicas de los fluidos involucrados. El fluido térmico considerado es un aceite diseñado para esos fines, cuyas propiedades las entrega el proveedor. Por su parte, las propiedades del lixiviado —en su mayoría— fueron calculadas a partir de correlaciones propuestas para el agua de mar. A pesar de que ambas soluciones no presentan las mismas características, el uso de estas correlaciones permite incluir el efecto de la salinidad en algunas propiedades. Una primera aproximación puede ser considerar las propiedades del agua, pero pequeñas variaciones producidas por efecto del contenido de sal, pueden tener efectos importantes a nivel de diseño de procesos de desalinización [42].

Para el dimensionamiento del campo solar se utilizó el programa SAM (*System Advisor Model*) que además de calcular el área de apertura requerida, permite hacer simulaciones horarias. Ésta es una herramienta que tiene una gran precisión en los cálculos de diversas variables; los distintos modelos han sido validados con datos de plantas existentes, obteniéndose para el modelo *CSP parabolic trough (physical)* resultados que difieren en menos de un 3% respecto a los valores reales [67].

Dentro de los datos de entrada que SAM requiere se tiene el recurso solar y condiciones meteorológicas. Los datos de radiación fueron obtenidos del Explorador Solar, potente herramienta que abarca todo el territorio nacional. Se han comparado los resultados de irradiancia global horizontal entregados por el modelo con los datos medidos en 78 estaciones distribuidas a lo largo del país, resultando en la mayoría de los casos diferencias que no superan el 10%. Teniendo en cuenta la incertidumbre de las mediciones y de los datos usados en el modelo, se sugiere considerar, para la zona norte y centro, un rango de incertidumbre en la insolación diaria de 5% y de 10% para los datos horarios [68].

En relación a los demás datos meteorológicos, fueron obtenidos de la estación de monitoreo con que cuenta la empresa. Puede ser que los datos de Santiago que fueron usados para algunas variables no sean representativos de las condiciones del lugar, sin embargo, de ellas solo una es usada por el modelo. Se debe ser cuidadoso en el formato del archivo que contiene los datos, ya que es la única forma en que SAM los puede leer.

En cuanto a las demás entradas, se debe hacer la conversión de potencia térmica a eléctrica para ingresar el requerimiento energético, ya que las salidas del modelo se basan en la generación de electricidad. Las propiedades del colector y fluido térmico corresponden a aquellos que fueron tomados como referencia para efectos del cálculo del área de apertura. De todas maneras, se espera que si se escoge otro modelo de colector, el principal cambio en los resultados esté en el número de colectores requeridos y en menor medida en el área, ya que se presume que la eficiencia se mueve en un rango pequeño.

Para el cálculo del área de apertura se define un punto de diseño. En este caso la única variable de referencia que se puede definir es la irradiancia normal directa, siendo su elección de gran relevancia en los cálculos; un valor muy bajo puede llevar a sobredimensionar el sistema, con la consecuente pérdida de energía y mayor costo, mientras que si se usa un valor muy alto, el sistema rara vez alcanzará su capacidad nominal.

En general, todos los resultados entregados por SAM dependen de las entradas, por lo que éstas deben ser definidas de manera tal que sean lo más representativas posibles de la situación que se desea modelar. En este caso, algunas variables quedaron con los valores predeterminados por el programa, sin embargo, estos son definidos y revisados constantemente por el NREL, por lo que aplican a la tecnología.

En cuanto al área de apertura obtenida, coincide con lo esperado para el requerimiento energético, esto en base a otros proyectos. El área total de terreno depende del espacio entre colectores y del tamaño de estos. Para el tamaño de colector que se tomó como referencia y con un espacio entre filas de 3 metros, se obtiene un área que es alrededor de una cuarta parte de una cancha de fútbol. En base a la precisión que se reporta para los modelos de SAM y los datos meteorológicos, se espera que sea una aproximación con un bajo error asociado.

La salida térmica del sistema varía a lo largo del año y del día, siguiendo el comportamiento de la irradiancia solar. Esta intermitencia es propia de esta fuente de energía y una manera de evitarla

es utilizar sistemas de almacenamiento térmico, sin embargo, esta alternativa no considera su uso.

El intercambiador de calor fue dimensionado utilizando el método de la diferencia de temperatura media logarítmica que resulta muy adecuado para la determinación del tamaño de un intercambiador, cuando se conocen o se pueden determinar las temperaturas de entrada y salida de los fluidos, así como los flujos másicos. Los cálculos del dimensionamiento se basan en una serie de supuestos, los que frecuentemente se logran en la práctica y simplifican el análisis con poca pérdida de exactitud.

La acumulación de depósitos en las superficies de transferencia de calor suele deteriorar el rendimiento de los intercambiadores, resultando en una mayor resistencia térmica y, a menudo, un aumento en la caída de presión y potencia de bombeo. En aplicaciones donde es probable que ocurra, el efecto de este fenómeno debe considerarse en el diseño y, como ya se dijo, en la selección del equipo. Puede ser determinante en la cantidad de material empleado, así como la frecuencia de limpieza. Asimismo, se traduce en mayores costos de capital y de mantención, como también en pérdidas de producción y mayor requerimiento de energía. En este caso se consideraron factores de incrustación promedio para cada fluido, los que se espera puedan representar estos efectos, aunque varíen en el tiempo y producto de la temperatura y velocidad de los fluidos [43].

El coeficiente global de transferencia de calor se calculó a partir de los coeficientes individuales. El que resultó en un menor valor es el correspondiente al espacio anular entre ambos tubos. Dado que las propiedades del fluido están dadas, una forma de incrementar su valor es modificando los diámetros de los tubos; específicamente, disminuyendo la diferencia entre el diámetro del tubo interno y externo. También se puede modificar el flujo másico del fluido caliente, pero éste queda determinado por el balance de energía. Cualquier aumento en este coeficiente se traduce en un mayor coeficiente global y una menor área. No obstante lo anterior, es importante tener en cuenta que la mejora en la transferencia de calor suele venir acompañada de un aumento en la caída de presión y, como consecuencia, de una potencia de bombeo más alta. Por otro lado, cabe destacar que la incertidumbre en el valor predicho en el coeficiente global puede incluso sobrepasar el 30% [43].

En algunos intercambiadores el tubo interior presenta corrugación que reduce el ensuciamiento y aumenta la eficiencia térmica, éste es el caso del que se tomó como referencia, sin embargo, no se consideró en los cálculos.

Dado el largo obtenido, podría pensarse en un intercambiador más compacto, pero no se recomienda para este caso por los problemas de operación que se han mencionado antes. Además, está dentro de las dimensiones que se pueden encontrar en la industria. En cuanto al material, se diseñó en base a acero inoxidable resistente a la corrosión. Puede considerarse otro que ofrezca mayor resistencia y los cálculos no se verían afectados en mayor medida.

Este equipo también considera una operación de 10 horas al día, correspondientes a las horas de sol en que el campo solar puede trabajar. Sin almacenamiento, la operación durante la noche no se justifica.

El área del destilador fue obtenida a partir de los balances de energía en la cubierta y en el lixiviado, los que resultan en un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas. Como la dirección y magnitud de la radiación cambian constantemente a lo largo del día, al igual que las demás condiciones meteorológicas; dada un área, la resolución de este sistema permite obtener la temperatura del lixiviado y de la cubierta en función del tiempo. En este caso lo que se busca es el área, precisamente, por lo que se debió definir un punto de diseño.

La temperatura del lixiviado se fijó en 60 [°C], ya que, dadas las condiciones ambientales (irradiancia, temperatura ambiente, humedad relativa, etc.), era el máximo valor con el cual se encontraba un área tal que la energía absorbida fuese mayor que las pérdidas al ambiente. Se observa que a mayor temperatura de operación, mayor es el área, pero también aumenta la tasa de evaporación. Se espera que al precalentar el lixiviado, efectivamente, esta temperatura pueda ser alcanzada.

En cuanto a la inclinación de la cubierta, se usó el valor con el que se lograba una mayor producción de destilado. Esto todo en base a los cálculos para el punto de diseño. En general, no hay consenso respecto a la pendiente óptima.

A diferencia del colector cilindro parabólico, el destilador usa la componente directa y difusa de la radiación, por lo que se tomó como referencia el promedio anual de la radiación incidente en panel entregada por el Explorador Solar.

Bajo estas condiciones, el área obtenida es similar al de las piscinas aeróbica y anaeróbica y alrededor de un 70% del tamaño de una cancha de fútbol. Por su parte, la producción de destilado es alrededor de un cuarto del volumen de lixiviados a tratar que se definió según el caso base y depende —para efectos de cálculos de dimensionamiento— de las condiciones ambientales y de la temperatura del lixiviado. Si bien es cierto, al aumentar el área debería aumentar la captación de energía solar, así también aumentan las pérdidas al ambiente, según se explicó en párrafos anteriores. Ante esto, se puede repartir el volumen a tratar en varias piscinas del mismo tamaño, sin embargo, antes se debe analizar el comportamiento del sistema en función del tiempo para el área obtenida.

A modo de comparación, en la primera planta de desalinización solar ubicada en el desierto de Atacama se producían alrededor de 20.000 litros de agua fresca por día, con un área aproximada de 5.000 [m<sup>2</sup>]. Luego, el resultado obtenido no se aleja de este valor. Si bien es cierto las condiciones de radiación en el norte son más favorables, en este caso eso de alguna manera se compensa con el precalentamiento del lixiviado.

Al igual que para el campo solar, el área obtenida corresponde a un punto de diseño, por ende, al resolver el sistema para las temperaturas de la cubierta y del lixiviado, podría ser que pocas veces se tenga la misma combinación de temperaturas definidas para el cálculo, pudiendo ser mayores o menores, dependiendo de las condiciones de operación. Lo mismo ocurre con la tasa de

evaporación. Por lo tanto, se debe ser cuidadoso al elegir el punto de diseño, de modo que sea representativo de una situación más general. Cabe destacar que el diseño y operación de todo el sistema está sujeto a las 10 horas de sol con que se cuenta.

En relación a la estimación de costos, ésta se hizo utilizando métodos distintos para cada componente. Los costos de inversión del campo solar fueron estimados en base a los datos que entrega SAM, los que son determinados para Estados Unidos y se basan en una planta con una capacidad de 100 [MWe] con un área de apertura cercana a 100 hectáreas. Luego, se debe tener en cuenta la diferencia en la escala de producción con el caso en estudio que es menos de un 0,2%. De todas maneras, sí son datos representativos de la tecnología y es la mejor fuente de datos que se tiene; conseguir una cotización con el nivel de incertidumbre con que se está trabajando es muy difícil.

Para estimar el precio de compra del intercambiador se utilizó una correlación y los demás ítems involucrados en el costo total fueron calculados como un porcentaje de la inversión de capital fijo total. Para la actualización del costo se usó el índice CEPCI del año 2015, debiendo ser corroborado para el año 2016. De esta manera, se logra una estimación preliminar que aún tiene un alto porcentaje de error. Para obtener una cotización por parte del fabricante, en una etapa de diseño más avanzada, es necesario incluir, además, el diseño mecánico. Si se desean especificaciones distintas a las estándar, el equipo será más costoso.

En el caso del destilador la estimación se basó en los datos que maneja la empresa para la construcción de piscinas de almacenamiento. Este dato es, tal vez, el más preciso de los obtenidos para los distintos componentes, sin embargo, a éste se debe sumar el costo de la cubierta, cuya estimación no consideró transporte ni instalación.

De acuerdo a esta estimación preliminar, el principal costo de inversión se asocia al campo solar (64%), según lo esperado; no obstante, debido al grado de incertidumbre de esta etapa de diseño, las proporciones pueden cambiar al pasar a una etapa con mayor nivel de detalle. Además, no se consideró el costo del terreno, el que aunque no deba ser comprado por la empresa, sí puede tener un uso alternativo.

Los costos de operación fueron estimados en base a los de la planta de tratamiento actual. Estos pueden representar de manera adecuada los costos de administración general, instalaciones, insumos, etc. Sin embargo, no considera los costos de mantención y otros relacionados directamente con la operación de la alternativa propuesta.

Los beneficios fueron calculados en base a datos de la empresa, con precios que resultan ser realistas, sin embargo, dependen directamente de la producción de destilado.

En cuanto a los flujos obtenidos, todos son negativos, excepto el del último año de evaluación que considera el valor residual de los activos y el del primero, en el cual se recupera el IVA de la inversión. El escenario para el que se realizó el flujo de caja es arbitrario, sin embargo, permite visualizar una tendencia en el comportamiento de los flujos. En términos económicos este proyecto no es una alternativa atractiva, sin embargo, en la evaluación deben considerarse otros criterios que podrían llevar a la decisión de invertir en él.

La evaluación ambiental contempla la identificación de potenciales impactos ambientales. Varios de los encontrados tienen relación con la recirculación del lixiviado que se hace actualmente, los que se reducirían en alguna medida al implementar la alternativa. Para tener mayor certeza sobre estos impactos se debe conocer la capacidad de campo, por esto también, se recomienda determinar este dato.

Se presume la obtención de agua que cumpla con los requerimientos de calidad para riego, en base a la experiencia que se reporta en bibliografía. Así y todo, se deben analizar los gases que podrían condensar junto con el vapor de agua e incluir una etapa de remoción si es necesario. Además, antes de usarla para cualquier fin, se deben hacer todos los análisis de calidad correspondientes.

Considerando los potenciales impactos negativos del sistema de tratamiento actual que podrían reducirse y aquellos impactos positivos que traería consigo el sistema propuesto, se tendría un beneficio ambiental sostenido, por lo que desde el punto de vista de la sustentabilidad ambiental, el proyecto es atractivo.

Desde el punto de vista económico, el proyecto no es conveniente en estos momentos, pero técnica y ambientalmente es factible, por lo que —en base a esta evaluación preliminar— se recomienda avanzar en las etapas de evaluación. Igualmente, es importante destacar que existen detalles de diseño mecánico que deben considerarse aún, como el sistema de limpieza y la forma en que el área requerida del destilador será distribuida. Esto último, dado que, por un lado, no existen en el mercado láminas de vidrio de la superficie requerida y, por otro, que podría ser difícil soportar una cubierta de ese tamaño. Si se consideran varios destiladores de menor tamaño, debe encontrarse una configuración tal que no se hagan sombra, por ejemplo. Si esto resulta en muchas complicaciones se puede estudiar otra configuración para el sistema de destilación, como la destilación solar multiefectos en alguna de sus variantes; la de apilamiento, por ejemplo.

Además, siempre existe la inquietud sobre la capacidad del sistema de tratar el lixiviado crudo. Ante esto es necesario realizar pruebas; a priori, no se aseguran los mismos resultados, debido las distintas concentraciones de contaminantes. Todos los resultados obtenidos aplican para el caso base que fue definido.

Por otro lado, la implementación de la tecnología solar plantea el desafío de generar competencias laborales y la integración del conocimiento local.

Finalmente, se tiene que la evaluación técnica, económica y ambiental permite visualizar las ventajas y desventajas de un proyecto, además de identificar aspectos en los que se podría trabajar para hacer la alternativa más atractiva.

## 9 Conclusiones y recomendaciones

Se propuso un sistema de secado de lixiviados utilizando energía solar térmica, tomando como caso de estudio el relleno sanitario Loma Los Colorados (RSLLC) de KDM Empresas, ubicado en la comuna de Til Til, Región Metropolitana.

Actualmente, estas corrientes líquidas son sometidas a un tratamiento biológico y, posteriormente, recirculadas al relleno, usadas en riego de caminos impermeabilizados y/o acumulados en piscinas de almacenamiento. No existe reducción de volumen ni recuperación de recursos. Asimismo, el volumen de lixiviados que se genera ha aumentado a lo largo de los años, al igual que la concentración de algunos contaminantes.

Si bien existen distintas alternativas de secado que permiten el uso de la energía solar térmica, algunas como secadores y desalinización multietapas se descartaron por los problemas operacionales que se ocasionarían a raíz de las características del lixiviado.

Igualmente, existen distintos tipos de colectores solares —concentradores y no concentradores— que permiten alcanzar distintas temperaturas de operación, desde 100 [°C] hasta alrededor de 1.000 [°C], variando también su idoneidad para distintas aplicaciones. Asimismo, presentan diferente grado de madurez tecnológica y comercial.

Se propuso un sistema de secado de lixiviados que se incorpore como una etapa adicional, posterior al sistema de tratamiento actual. Esta alternativa consta de un campo de colectores solares cilindro parabólicos que captan la radiación solar y la transforman en energía térmica de un fluido de transferencia de calor —un aceite— que circula a través de él. Este fluido, por medio de un intercambiador de calor de doble tubo, transfiere la energía absorbida al lixiviado, el cual —de esta manera— aumenta su temperatura antes de ingresar a un destilador solar de bandeja, donde se evapora y condensa parte del contenido de agua. Así, se espera obtener un residuo sólido o semi-sólido y una corriente líquida con una carga contaminante considerablemente menor a la del lixiviado crudo, la que incluso se presume podría cumplir con la norma de calidad de agua para riego.

Se dimensionó el sistema tomando como caso base un flujo de efluente a tratar igual a 120 [m<sup>3</sup>/día]. En base a esto y a las condiciones de operación que fueron definidas, se obtuvo un área de apertura del campo solar igual a 688 [m<sup>2</sup>] y un área de terreno total de 1.740 [m<sup>2</sup>]. En cuanto al intercambiador de calor, el área de transferencia requerida resultó en un valor igual a 19 [m<sup>2</sup>] con un largo de 118 [m]. Finalmente, para el destilador se obtuvo un área de bandeja igual a 4.470 [m<sup>2</sup>] y una producción de destilado igual a 0,000173 [kg/m<sup>2</sup> · s], la que para 10 horas de operación resulta en un volumen diario de destilado de 27,7 [m<sup>3</sup>].

Mediante distintos métodos se estimaron los costos de inversión y operación del sistema. Los costos de inversión obtenidos para el campo solar, intercambiador de calor y destilador solar fueron 220.537 [\$USD], 25.305 [\$USD] y 97.709 [\$USD], respectivamente. Esto se traduce en un costo de inversión del sistema del orden de 344.000 [\$USD]. El costo del campo solar corresponde

a un 64% del total. En cuanto a los costos de operación, estos fueron estimados —de forma preliminar— en 64.600 [\$USD/año].

Como beneficios económicos del proyecto se consideraron ahorros de costos asociados a la recirculación del efluente y a la compra de agua potable para riego, los que fueron estimados en 64.300 [\$USD/año].

Desde el punto de vista ambiental, se identificaron potenciales impactos positivos y negativos asociados a la alternativa de tratamiento propuesta. Entre los primeros destacan los potenciales impactos negativos del sistema de gestión actual (recirculación y acumulación) que se reducirían en cierta medida con su implementación, al igual que se presume la obtención de agua que pueda usarse para riego; esto disminuiría el impacto asociado al transporte del agua y, además, recupera un recurso escaso. Los potenciales impactos positivos superan a los negativos, por lo que la alternativa que se propone sería capaz de entregar un beneficio ambiental sostenido.

A partir de la evaluación realizada, se concluye que, desde el punto de vista económico, el proyecto no es conveniente en estos momentos, sin embargo, es factible desde el punto de vista técnico y ambiental. De acuerdo a estos dos criterios, el sistema propuesto cumple con su objetivo, por lo que se recomienda continuar con una evaluación más detallada. Si bien la evaluación se realizó para un caso base dado, el análisis se puede extender a otros contextos, utilizando la misma metodología.

En particular, para las etapas que vendrían inmediatamente en la evaluación, se recomienda revisar el diseño mecánico del sistema, ajustar la estimación de costos y realizar pruebas para analizar la calidad del destilado y la posible presencia de gases que pudiesen condensar con el vapor de agua. Asimismo, mediante un prototipo se puede estudiar el comportamiento del sistema a lo largo del día, calculando su eficiencia y productividad.

## 10 Bibliografía

- [1] PNAS, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. Tracking the ecological overshoot of the human economy. [en línea] <<http://www.pnas.org/content/99/14/9266.full>> [consulta: 09 diciembre 2015].
- [2] EPA, United States Environmental Protection Agency. Learn About Sustainability. [en línea] <<http://www.epa.gov/sustainability/learn-about-sustainability%20-%20what>> [consulta: 09 diciembre 2015].
- [3] Gobierno de Chile, Ministerio del Medio Ambiente. Informe del Estado del Medio Ambiente 2011. Capítulo 3. Residuos. Archivo PDF, 2011. [en línea] <[http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016\\_Capitulo\\_3.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016_Capitulo_3.pdf)> [consulta: 01 junio 2016].
- [4] Gobierno de Chile, Comisión Nacional del Medio Ambiente. Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. Archivo PDF, 2010. [en línea] <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49564\\_informe\\_final.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49564_informe_final.pdf)> [consulta: 12 diciembre 2015].
- [5] Gobierno de Chile, Comisión Nacional del Medio Ambiente. Política de gestión integral de residuos sólidos. Archivo PDF, 2005. [en línea] <[http://www.sinia.cl/1292/articles-26270\\_pol\\_rsd](http://www.sinia.cl/1292/articles-26270_pol_rsd)> [consulta: 12 diciembre 2015].
- [6] CHILE. Ministerio de Salud. 2008. Decreto Supremo N°189: Reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios, enero 2008. 15p.
- [7] Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. Gestión integral de residuos sólidos. México, McGraw-Hill, 1994. 1120p.
- [8] Prieto, Francisco O. Diseño de vertederos controlados de residuos sólidos. (I) Balances de Materia y Energía. Ingeniería Química, (352): 117-125, 1998.
- [9] Prieto, Francisco O. Diseño de vertederos controlados de residuos sólidos. (II) Gestión de efluentes residuales. Ingeniería Química, (353): 225-231, 1999.
- [10] EIA, U.S Energy Information Administration. International Energy Outlook 2014. [en línea] <<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>> [consulta: 15 diciembre 2015].
- [11] Gobierno de Chile, Ministerio de Energía. Agenda de Energía. Un desafío país, progreso para todos. Archivo PDF, 2014. [en línea] <[http://www.cumplimiento.gob.cl/wp-content/uploads/2014/03/AgendaEnergiaMAYO2014\\_FINAL.pdf](http://www.cumplimiento.gob.cl/wp-content/uploads/2014/03/AgendaEnergiaMAYO2014_FINAL.pdf)> [consulta: 15 diciembre 2015].
- [12] Generadoras de Chile A.G. Boletín del Mercado Eléctrico. Sector Generación. Archivo PDF, 2016. [en línea] <<http://generadoras.cl/wp-content/uploads/Bolet%3%ADn-Generaci%3%B3n-Mayo-2016.pdf>> [consulta: 07 de junio 2016].
- [13] Gobierno de Chile, Ministerio de Energía. Agenda de Energía. Energías Renovables no convencionales. [en línea]

- <[http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14\\_portal\\_informacion/la\\_energia/ernc.html](http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14_portal_informacion/la_energia/ernc.html)> [consulta: 15 diciembre 2015].
- [14] Gobierno de Chile, Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables (Ministerio de Energía). Reporte CIFES. Energías Renovables en el Mercado Eléctrico Chileno Mayo 2016. Archivo PDF, 2016. [en línea] <[http://cifes.gob.cl/wpcontent/uploads/2016/05/Reporte\\_CIFES\\_Mayo.pdf](http://cifes.gob.cl/wpcontent/uploads/2016/05/Reporte_CIFES_Mayo.pdf)> [consulta: 07 de junio 2016].
- [15] Jiménez-Estévez, G., Palma-Behnke, R., Román, R., Morán, L. Heat and Dust. IEEE power and energy magazine, 13(2): 71-77, 2015.
- [16] Solargis. World solar resource maps. [en línea] <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>> [consulta: 27 septiembre 2016].
- [17] McCabe, W., Smith, J., Harriot, P. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 4.ª ed. Madrid, Mc Graw-Hill, 1991. 1112 p.
- [18] Duffie, John A. y Beckman, William A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4.ª ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2013. 936p.
- [19] NASA, Earth Observatory. Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE). [en línea] <[http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SORCE/sorce\\_02.php](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SORCE/sorce_02.php)> [consulta: 15 diciembre 2015].
- [20] Kalogirou, Soteris A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 30(3): 231-295, 2004.
- [21] Qiblawey, Hazim M. y Banat, Fawzi. Solar thermal desalination technologies. Desalination, 220(1-3): 633-644, 2008.
- [22] Tian, Y. y Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. Applied Energy, 104: 538-553, 2013.
- [23] Román, Roberto. SERC Chile. Energía solar y Chile: Conversión Solar y Retscreen. Archivo PDF, 2014. [en línea] <<http://eventos.cmm.uchile.cl/metrosolar2014/wp-content/uploads/sites/11/2014/01/SolarChile-M2-Ene2014.pdf>> [consulta: 27 julio 2016].
- [24] Starke, A.R., Cardemil, J.M., Escobar, R., Lemos, L., Colle, S. 2015. Assessing the performance of Concentrated Solar Power plants in selected locations of Chile. En: INTERNATIONAL CONFERENCE on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems: 30 de junio-3 de julio, 2015. Pau, Francia. PETROBRAS/CENPES, CONICYT. 13p.
- [25] CSP Today. Crece la competencia de la CSP con el nuevo diseño Fresnel al permitir temperaturas más altas. [en línea] <<http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/crece-la-competencia-de-la-csp-con-el-nuevo-dise%C3%B1o-fresnel-al-permitir-temperaturas-m%C3%A1s-a>> [consulta: 27 septiembre 2016].

- [26] Gobierno de Chile, Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables (Ministerio de Energía). Energía Solar. Archivo PDF, 2011. [en línea] <[http://cifes.gob.cl/tecnologias/files/2011/12/libro\\_solar.pdf](http://cifes.gob.cl/tecnologias/files/2011/12/libro_solar.pdf)> [consulta: 16 noviembre 2015].
- [27] CSP Today. ¿Puede superar la Fresnel a la cilindroparabólica? [en línea] <<http://es.csptoday.com/tecnolog%C3%ADa/%C2%BFpuede-superar-la-fresnel-la-cilindroparab%C3%B3lica>> [consulta: 27 septiembre 2016].
- [28] Reyes Vigh, Cristian Felipe. Influencia del almacenamiento térmico en el desempeño de una planta termosolar para la generación de electricidad. Memoria (Ingeniería Civil Electricista). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2012. 136p.
- [29] Gnanadason, M., Kumar, P., Sivaraman G., Ebenezer, J. Daniel, S. Design and Performance Analysis of a Modified Vacuum Single Basin Solar Still. Smart Grid and Renewable Energy, 2(4): 388-395, 2011.
- [30] Murugavel, K., Chockalingamn, Kn., Srithar, K. Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still. Desalination, 220(1-3): 677-686, 2008.
- [31] Fath, H. y Hosny, H.M. Thermal performance of a single-sloped basin still with an inherent built-in additional condenser. Desalination, 142(1): 19-27, 2002.
- [32] El-Bahi, A. y Inan, D. Analysis of a parallel double glass solar still with separate condenser. Renewable Energy, 17(4): 509-521, 1999.
- [33] El-Bahi, A. e Inan, D. A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser. Desalination, 123(1): 79-83, 1999.
- [34] Singh, S.K., Bhatnagar, V.P., Tiwari, G.N. Design parameters for concentrator assisted solar distillation system. Energy Conversion and Management, 37 (2): 247-252, 1996.
- [35] Kumar, S. y Tiwari, G.N. Performance evaluation of an active solar distillation system. Energy, 21 (9): 805-808, 1996.
- [36] Badran, O. y Al-Tahaineh, H.A. The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity. Desalination, 183(1-3): 137-142, 2005.
- [37] Abdel-Rehim, Z. y Lasheen, A. Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt. Desalination, 217(1-3): 52-64, 2007.
- [38] Alternative Energy. MicroCSP (Concentrated Solar Power). [en línea] <[http://www.altenergymag.com/content.php?post\\_type=1804](http://www.altenergymag.com/content.php?post_type=1804)> [consulta: 14 septiembre 2016].
- [39] CSP Today. Niche Markets for micro-CSP. [en línea] <<http://social.csptoday.com/markets/niche-markets-micro-csp>> [consulta: 14 septiembre 2016].

- [40] Polytex. Geomembranas HDPE. [en línea] <<http://www.polytex.cl/geohdpe.html>> [consulta: 20 septiembre 2016].
- [41] Fundación Centro Canario del Agua, FCCA. Salinidad del agua de riego. Archivo PDF, 2015. [en línea] <[http://fcc.a.es/documentos/05\\_documentos\\_por\\_temas/Estandares%20de%20calidad%20de%20las%20aguas%20Tablas%20de%20estandares\(3\)/Salinidad\\_del\\_agua\\_de\\_riego.pdf](http://fcc.a.es/documentos/05_documentos_por_temas/Estandares%20de%20calidad%20de%20las%20aguas%20Tablas%20de%20estandares(3)/Salinidad_del_agua_de_riego.pdf)> [consulta: 28 junio 2016].
- [42] Sharqawy, M.H., Lienhard, J.H., Zubair, S.M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment*, 16: 354-380, 2010.
- [43] Cengel, Y.A. y Ghajar, A.J. Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones. 4.<sup>a</sup> ed. México D.F., Mc Graw-Hill, 2011. 944 p.
- [44] Radco. Xceltherm® 600– Engineering Properties. [en línea] <<http://www.radcoind.com/wp-content/uploads/600eng.pdf>> [consulta: 03 julio 2016].
- [45] NREL, National Renewable Energy Laboratory. Welcome to SAM. [en línea] <<https://sam.nrel.gov/>> [consulta: 22 septiembre 2016].
- [46] Gobierno de Chile, Ministerio de Energía. Explorador de Energía Solar para Autoconsumo. [en línea] <<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>> [consulta: 08 septiembre 2016].
- [47] Sopogy. SopoNova® Industrial and Utility Parabolic Trough Solar Collector. [Archivo PDF] Honolulu, Estados Unidos. 2011, 2p.
- [48] SolarServer. MicroCSP in Hawaii: Sopogy awarded funding for innovative solar thermal air conditioning Project. [en línea] <<http://www.solarserver.com/solar-magazine/solar-news/archive-2010/kw40/microcsp-in-hawaii-sopogy-awarded-funding-for-innovative-solar-thermal-air-conditioning-project.html>> [consulta: 10 octubre 2016].
- [49] Radco. XCEL THERM® 600 – Typical Properties. [en línea] <<http://www.radcoind.com/industrial-energy/xceltherm-600/>> [consulta: 03 julio 2016].
- [50] Sacome. Cómo disminuir las paradas en una planta de biogás: instalación de un intercambiador de calor tubular para el calentamiento de lodos. [en línea] <<http://www.sacome.com/portfolio-view/tratamiento-de-aguas-residuales-wastewater-treatment/>> [consulta: 27 septiembre 2016].
- [51] Sacome. SACOME® TF20. Intercambiador de tubo corrugado. Archivo PDF, 2013. [en línea] <[http://www.sacome.com/wp-content/uploads/2013/07/sacome\\_heat\\_exchanger\\_tf20.pdf](http://www.sacome.com/wp-content/uploads/2013/07/sacome_heat_exchanger_tf20.pdf)> [consulta: 07 julio 2016].
- [52] Kakaç, Sadik y Liu, Hongtan. Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design. 2.<sup>a</sup> ed. Boca Raton, CRC Press, 2002. 520p.

- [53] Belessiotis, V., Kalogirou, S. Delyannis, E. Thermal Solar Desalination: Methods and Systems. Academic Press, 2016. 368p.
- [54] Universidad de Arizona. Dewpoint Formulas. [en línea] <<https://ag.arizona.edu/azmet/dewpoint.html>> [consulta: 27 septiembre 2016].
- [55] Perry, Robert H. y Green, Don W. Chemical Engineer's Handbook. 8.ª ed. Mc Graw-Hill, 2008. 2755 p.
- [56] Peters, M., y Timmerhaus, K. Plant design and economics for chemical engineers. 4.ª ed. McGraw-Hill, 1991. 910p.
- [57] Couper, J., Penney, W., Fair, J., Walas, S. Chemical Process Equipment. Selection and Design. 2.ª ed. Burlington, Elsevier Inc., 2005. 814p.
- [58] CEPCI 2003. Universidad de Los Andes Venezuela. Chemical Engineering Plant Cost Index from 1950 to 2008. [Archivo Excel], 2008.
- [59] Chemical Engineering. Current economic trends - march 2016. [en línea] <<http://www.chemengonline.com/current-economic-trends-march-2016/>> [consulta: 17 octubre 2016].
- [60] Catálogo Arquitectura Chile. Cristal Extra Claro Pilkington Optiwhite / Vidrios Lirquén. [en línea] <<http://www.catalogoarquitectura.cl/cristal-extra-claro-pilkington-optiwhite-vidrios-lirquen/>> [consulta: 05 octubre 2016].
- [61] SII, Servicio de Impuestos Internos. Dólar observado 2016. [en línea] <<http://www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2016.htm>> [consulta: 17 octubre 2016].
- [62] SII, Servicio de Impuestos Internos. Nueva tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado. [en línea] <[http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla\\_vida\\_enero.htm](http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm)> [consulta: 17 octubre 2016].
- [63] FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Sostenibilidad e impacto ambiental. [en línea] <<http://www.fao.org/docrep/008/a0323s/a0323s05.htm>> [consulta: 17 octubre 2016].
- [64] Revista Electricidad. Concentración Solar de Potencia y sus impactos ambientales. [en línea] <<http://www.revistaei.cl/reportajes/concentracion-solar-de-potencia-y-sus-impactos-ambientales/>> [consulta: 19 octubre 2016].
- [65] Banco Mundial. Emisiones de CO2 originadas por el transporte (% del total de la quema de combustible). [en línea] <<http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.CO2.TRAN.ZS>> [consulta: 19 octubre 2016].
- [66] Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. Journal of Hazardous Materials, 150(3): 468-493, 2008.

[67] NREL, National Renewable Energy Laboratory. System Advisor Model (SAM) Case Study: Andasol-1. [Archivo PDF] Estados Unidos. 2012, 10p.

[68] Gobierno de Chile, Ministerio de Energía. Explorador Solar para autoconsumo. Archivo PDF, 2016. [en línea]  
<[http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/doc/Manual\\_Explorador\\_Solar.pdf](http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/doc/Manual_Explorador_Solar.pdf)> [consulta: 08 septiembre 2016].

[69] CHILE. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 2000. Decreto Supremo N°90: Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, mayo 2000. 16p.

# 11 Anexos

## 11.1 Anexo A. Características del lixiviado

Tabla 11.1. Valores promedio año 2015 de parámetros medidos en laboratorio interno, correspondientes al muestreo en sumidero y a la salida de los sedimentadores. Se incluye comparación con Tabla N°1 D.S. N°90/00.

Parámetro	Unidad	Sumidero	Salida Sedimentadores	Valor máximo estipulado D.S N°90/00 [69]
Temperatura	[°C]	25,04	20,5	35
pH	[]	7,9	8,26	6-8,65
SST	[mg/L]	180,51	416,62	80
SSV	[mg/L]	-	276,23	N.A.
Volatilidad	%	-	68,61	N.A.
DBO <sub>5</sub>	[mg/L]	1.635,83	204,96	35
DQO	[mg/L]	6.093,65	5.540,53	N.A.
Cl <sup>-</sup>	[mg/L]	5.827,17	7.453,04	400
P <sub>s</sub>	[mg/L]	20,71	16,98	10*
N total	[mg/L]	1.941,07	1.177,95	50
NH <sub>3</sub>	[mg/L]	2.614,76	1.216,09	N.A.
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	[mg/L]	127,99	561,46	N.A.
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	[mg/L]	62,85	48,72	N.A.
Alcalinidad	[mg CaCO <sub>3</sub> /L]	7.971,79	4.786,44	N.A.
Conductividad	[mS/cm]	35,69	31,49	N.A.

\*Corresponde al límite para el fósforo total. N.A.: No Aplica.



Figura 11.1. Toma de muestra a la salida de un sedimentador.

## 11.2 Anexo B. Datos balance caso base

Tabla 11.2. Generación de lixiviados, balance hídrico año 2015.

Mes	Volumen generado [m <sup>3</sup> /mes]	Valor mín. mes [m <sup>3</sup> /día]	Valor máx. mes [m <sup>3</sup> /día]	Promedio diario [m <sup>3</sup> /día]
Enero	13.395	24	557	432
Febrero	8.701	18	661	310,8
Marzo	4.352	19	1.009	609,5
Abril	15.988	97	776	532,9
Mayo	20.369	380	1.875	657,1
Junio	15.735	255	683	524,5
Julio	25.623	439	3.068	826,5
Agosto	37.137	389	3.179	1.197,9
Septiembre	23.973	389	1.364,9	799,1
Octubre	28.661	529	1.784	924,6
Noviembre	17.114	72	863,8	570,5
Diciembre	15.637	376	798	521,2
<b>Promedio</b>	<b>18.890</b>	<b>248,9</b>	<b>1.384,9</b>	<b>658,9</b>

Tabla 11.3. Efluente planta de tratamiento de lixiviados, balance hídrico año 2015.

Mes	Producción Planta [m <sup>3</sup> /mes]	Promedio diario [m <sup>3</sup> /día]	Promedio diario* [m <sup>3</sup> /día]	Recirculación [m <sup>3</sup> /mes]	Recirculación Promedio diario [m <sup>3</sup> /día]
Enero	22.602	729	729	7.570	244
Febrero	10.068	360	360	4.970	178
Marzo	5.028	162	201	3.930	127
Abril	7.321	244	244	3.740	125
Mayo	5.829	188	188	2.660	86
Junio	7.049	235	235	3.010	100
Julio	1.614	52	107,6	941	30
Agosto	3.525	114	185,5	770	25
Septiembre	2.812	94	122,3	2.070	69
Octubre	3.654	118	243,6	3.470	112
Noviembre	5.400	180	180	6.550	218
Diciembre	7.088	229	229	7.970	257
<b>Promedio</b>	<b>6.832,5</b>	<b>225,4</b>	<b>252,1</b>	<b>3.970,1</b>	<b>130,9</b>

\*Promedio diario sin considerar los días en que se registra un flujo igual a cero, correspondientes a alguna falla en el sistema que impedía la descarga.

### 11.3 Anexo C. Correlaciones para cálculo de propiedades termofísicas

#### Sólidos Totales Disueltos (STD)

$$\begin{aligned} STD &= CE \cdot 0,64 \quad ; CE \leq 5.000 \text{ } [\mu\text{S/cm}] \\ STD &= CE \cdot 0,8 \quad ; CE > 5.000 \text{ } [\mu\text{S/cm}] \end{aligned} \quad (\text{C.1})$$

donde:

- $STD$ : Sólidos Totales Disueltos [mg/L]
- $CE$ : conductividad eléctrica [ $\mu\text{S/cm}$ ]

#### Calor específico

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (\text{C.2})$$

con

$$\begin{aligned} a &= 5,328 - 9,76 \times 10^{-2} \cdot S + 4,04 \times 10^{-4} \cdot S^2 \\ b &= -6,913 \times 10^{-3} + 7,351 \times 10^{-4} \cdot S + 3,15 \times 10^{-6} \cdot S^2 \\ c &= 9,6 \times 10^{-6} - 1,927 \times 10^{-6} \cdot S + 8,23 \times 10^{-9} \cdot S^2 \\ d &= 2,5 \times 10^{-9} + 1,666 \times 10^{-9} \cdot S - 7,125 \times 10^{-12} \cdot S^2 \end{aligned}$$

donde:

- $C_p$ : calor específico [kJ/kg · K]
- $T$ : temperatura [K]
- $S$ : salinidad [g/kg]

Rango de validez:  $273,15 \text{ } [K] < T < 453,15 \text{ } [K]$ ;  $0 \text{ } [g/kg] < S < 180 \text{ } [g/kg]$

#### Densidad

$$\rho = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5T^4 + b_1S + b_2ST + b_3ST^2 + b_4ST^3 + b_5S^2T^2 \quad (\text{C.3})$$

con

$$\begin{aligned} a_1 &= 9,999 \times 10^2 \\ a_2 &= 2,034 \times 10^{-2} \\ a_3 &= -6,162 \times 10^{-3} \\ a_4 &= 2,261 \times 10^{-5} \\ a_5 &= -4,657 \times 10^{-8} \\ b_1 &= 8,020 \times 10^2 \\ b_2 &= -2,001 \\ b_3 &= 1,677 \times 10^{-2} \\ b_4 &= -3,060 \times 10^{-5} \\ b_5 &= -1,613 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

donde:

- $\rho$ : densidad [kg/m<sup>3</sup>]
- $T$ : temperatura [°C]
- $S$ : salinidad [kg/kg]

Rango de validez:  $0 \text{ } [^\circ\text{C}] < T < 180 \text{ } [^\circ\text{C}]$ ;  $0 \text{ } [kg/kg] < S < 0,16 \text{ } [kg/kg]$

#### Viscosidad dinámica

$$\mu = \mu_w \cdot (1 + A \cdot S + B \cdot S^2) \quad (\text{C.4})$$

con

$$A = 1,541 + 1,998 \cdot 10^{-2} \cdot T - 9,52 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$$

$$B = 7,974 - 7,561 \cdot 10^{-2} \cdot T + [0,157 \cdot (T + 64,993)^2 - 91,296]^{-1}$$

$$\mu_w = 4,2844 \times 10^{-5} + (0,157 \cdot (T + 64,993)^2 - 91,296)^{-1}$$

donde:

- $\mu$ : viscosidad dinámica [kg/m · s]
- $T$ : temperatura [°C]
- $S$ : salinidad [kg/kg]

Rango de validez:  $0 [^{\circ}C] < T < 180 [^{\circ}C]$ ;  $0 [kg/kg] < S < 0,15 [kg/kg]$

### Calor latente de vaporización

$$h_{fgsw} = h_{fg} \cdot \left(1 - \frac{S}{1.000}\right) \quad (C.5)$$

Donde:

- $h_{fgsw}$ : calor latente de vaporización [kJ/kg]
- $h_{fg}$ : calor latente de vaporización del agua pura [kJ/kg]
- $S$ : salinidad [kg/kg]

## 11.4 Anexo D. Entradas SAM

### D.1 Variables de entrada SAM

Tabla 11.4. Detalle entradas SAM.

Solar Field	Valor definido	Valor predeterminado
Solar multiple	1	2
Row spacing (m)	3	15
Stow angle [degrees]	170	170
Deploy angle [degrees]	10	10
Number of field subsections	2	2
Header pipe roughness (m)	4.57e-005	4.57e-005
HTF pump efficiency	0.85	0.85
Freeze protection temp (°C)	20	150
Irradiation at design (W/m <sup>2</sup> )	1060	950
Allow partial defocusing	Simultaneous	Simultaneous
Field HTF fluid	User-defined	Therminol VP-1
Design loop inlet temp (°C)	93	293
Design loop outlet temp (°C)	176	391
Min single loop flow rate (kg/s)	0.32	1
Max single loop flow rate (kg/s)	2.6	12
Header design min flow velocity (m/s)	1	2
Header design max flow velocity (m/s)	3	3
Collector tilt (degrees)	0	0

<b>Collector azimuth (degrees)</b>	0	0
<b>Water usage per wash (L/m<sup>2</sup>,aper)</b>	0.7	0.7
<b>Washes per year</b>	63	63
<b>Hot piping thermal inertia (kWht/K-MWt)</b>	0.2	0.2
<b>Cold piping thermal inertia (kWht/K-MWt)</b>	0.2	0.2
<b>Field loop piping thermal inertia (Wht/K-m)</b>	4.5	4.5
<b>Non-Solar Field Land Area Multiplier</b>	1.4	1.4
<b>Number of SCA/HCE assemblies per loop*</b>	12	8
<b>Collectors (SCAs)</b>		
<b>Reflective aperture area (m2)</b>	5.21	656
<b>Aperture width, total structure (m)</b>	1.65	6
<b>Length of collector assembly (m)</b>	3.657	115
<b>Number of modules per assembly</b>	1	8
<b>Average surface-to-focus path length (m)</b>	0.49	2.15
<b>Piping distance between assemblies (m)</b>	0.4	1
<b>Tracking error</b>	0.988	0.988
<b>Geometry effects</b>	0.952	0.952
<b>Mirror reflectance</b>	0.91	0.93
<b>Dirt on mirror</b>	0.97	0.97
<b>General optical error</b>	1	1
<b>Receivers (HCEs)</b>		
<b>Absorber tube inner diameter (m)</b>	0.02326	0.076
<b>Absorber tube outer diameter (m)</b>	0.0254	0.08
<b>Glass envelope inner diameter (m)</b>	0.051	0.115
<b>Glass envelope outer diameter (m)</b>	0.055	0.12
<b>Absorber flow plug diameter (m)</b>	0	0
<b>Internal surface roughness</b>	4.5e-005	4.5e-005
<b>Absorber flow pattern (m)</b>	Tube flow	Tube flow
<b>Absorber material type</b>	304L	304L
<b>Variant weighting fraction**</b>	1	0.985
<b>Absorber absorptance</b>	0.97	0.963
<b>Absorber emittance</b>	0.207	Table
<b>Envelope absorptance</b>	0.04	0.02
<b>Envelope emittance</b>	0.86	0.86
<b>Envelope transmittance</b>	0.91	0.964
<b>Annulus gas type</b>	Air	Hydrogen
<b>Annulus pressure (torr)</b>	750	0.0001
<b>Estimated avg heat loss (W/m)</b>	9.07	190

<b>Bellows shadowing</b>	0.935	0.935
<b>Dirt on receiver</b>	0.98	0.98
<b>Power Cycle</b>		
<b>Design gross output (MWe)</b>	0.179	111
<b>Estimated gross to net conversion factor</b>	0.95	0.9
<b>Rated cycle conversion efficiency</b>	0.38	0.356
<b>Minimum required startup temp (°C)</b>	93	300
<b>Thermal Storage</b>		
<b>Full Load Hours of TES (hours)</b>	0	6

\*Se definen todos los colectores iguales.

\*\*No se consideran variaciones para las condiciones del receptor.

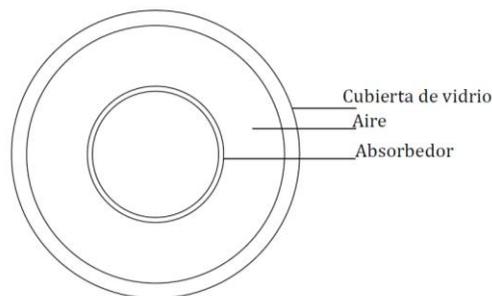
*Average surface-to-focus path length* se calcula según la siguiente ecuación:

$$F_{avg} = w \cdot \frac{\left(4 \cdot a^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2\right)^2}{a^2} \cdot \frac{12 \cdot a^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2}{12 \cdot w \cdot \left(4 \cdot a^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2\right)}$$

donde:

- $w$ : ancho de apertura [m]
- $a$ : largo focal [m]

*Estimated avg heat loss* se estimó considerando convección dentro del tubo absorbedor, la resistencia de la capa de aire en el espacio anular, la resistencia de la cubierta de vidrio y la convección al ambiente. La resistencia de la pared del tubo absorbedor se despreció, ya que es muy delgada y tiene una alta conductividad térmica.



## D.2 Descripción del formato SAM CSV

Las tres filas de encabezado proveen información de localización e información tecnológica. Además, identifica las columnas de datos.

**Fila 1.** Contiene etiquetas para la ubicación e información tecnológica que se describe en la fila 2:

*Location, City, Region, Country, Latitude, Longitude, Time Zone, Elevation, Source*

**Fila 2.** Contiene los datos identificados en la fila 1. Latitud, longitud, zona horaria y elevación son valores que SAM usa en los cálculos de la posición del sol durante las simulaciones. Por ejemplo:

*999999, RSLLC, RM, Chile, -32.962, -70.805, -4, 828, ExpSolar*

**Fila 3.** Etiquetas que identifican las columnas de datos. SAM usa las etiquetas para identificar las columnas, así que pueden estar en cualquier orden:

*Year, Month, Day, Hour, Global, Beam, Diffuse, Tdry, Tdew, RH, Pres, Wspd, Wdir, Snow depth, Alb*

**Filas 4-8763:** Datos identificados en la fila 3. Por ejemplo:

*2011, 3, 21, 17, 278.9, 757.0, 48.4, 21.3, 12, 47.3, 924.1, 3.2, 190, 99.9, 0.15*

De los datos contenidos en el archivo, el modelo *CSP parabolic trough (physical)* solo usa los siguientes:

- *Beam*: radiación normal directa
- *Pres*: presión atmosférica
- *Tdry*: temperatura de bulbo seco
- *Tdew*: temperatura de punto de rocío
- *RH*: humedad relativa
- *Wspd*: velocidad del viento

## 11.5 Anexo E. Dimensionamiento intercambiador de calor

La transferencia de calor en un intercambiador puede expresarse mediante la Ecuación 5.2

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_m$$

donde  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor,  $A_s$  es el área de transferencia de calor y  $\Delta T_m$  es una diferencia promedio de temperatura apropiada entre los dos fluidos.

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica, se tiene que la energía que cede el fluido caliente ( $h$ ) es igual a la que absorbe el fluido frío ( $c$ )

$$\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot C_{ph} \cdot (T_{hin} - T_{hout}) = \dot{m}_c \cdot C_{pc} \cdot (T_{cout} - T_{cin})$$

Luego, a partir de las temperaturas de entrada y salida del lixiviado —fluido frío— y de su flujo másico, es posible calcular  $\dot{Q}$ , considerando que  $\dot{m}_c$  se obtiene como el producto entre el flujo volumétrico y la densidad.

$$\dot{Q} = 121.412 \left[ \frac{kg}{día} \right] \cdot 4,053 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (55 - 20,5) [K] = 16.976.858 \left[ \frac{kJ}{día} \right]$$

Considerando 10 horas de sol al día, se tiene

$$\dot{Q} = 16.976.858 \left[ \frac{kJ}{día} \right] \cdot \frac{1 [día]}{10 [h]} \cdot \frac{1 [h]}{3.600 [s]} = 471,579 \left[ \frac{kJ}{s} \right]$$

Por otro lado, como esta energía debe ser entregada por el fluido térmico, a partir del valor calculado y de las temperaturas de entrada y salida de esta corriente, se puede calcular su flujo másico

$$\dot{Q} = 471,579 \left[ \frac{kJ}{s} \right] = \dot{m}_h \cdot 2,388 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (176 - 93) [K]$$

Luego,

$$\dot{m}_h = \frac{471,579 \left[ \frac{kJ}{s} \right]}{2,388 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot (176 - 93) [K]} = 2,37 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$\dot{m}_c = 121.412 \left[ \frac{kg}{día} \right] \cdot \frac{1 [día]}{10 [h]} \cdot \frac{1 [h]}{3.600 [s]} = 3,37 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

### Diferencia de temperatura media logarítmica

La diferencia de temperatura entre los fluidos caliente y frío varía a lo largo del intercambiador, por lo que el gradiente de temperatura apropiado tiene naturaleza logarítmica

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left( \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$$

con

$$\Delta T_1 = T_{hin} - T_{cout} = 176 [^{\circ}C] - 55 [^{\circ}C] = 121 [^{\circ}C]$$

$$\Delta T_2 = T_{hout} - T_{cin} = 93 [^{\circ}C] - 20,5 [^{\circ}C] = 72,5 [^{\circ}C]$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{121 [^{\circ}C] - 72,5 [^{\circ}C]}{\ln \left( \frac{121 [^{\circ}C]}{72,5 [^{\circ}C]} \right)} = 94,7 [^{\circ}C]$$

### Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor se calcula a partir de los coeficientes de transferencia de calor por convección interno ( $h_i$ ) y externo ( $h_o$ ), de la resistencia de la pared y de los factores de incrustación; según

$$U_o = \frac{1}{\left( \frac{D_o}{D_i} \right) \cdot \left( \frac{1}{h_{di}} \right) + \left( \frac{D_o}{D_i} \right) \cdot \left( \frac{1}{h_i} \right) + R_{pared} + \left( \frac{1}{h_o} \right) + \left( \frac{1}{h_{do}} \right)}$$

### Cálculo de $h_i$ y $h_o$

El coeficiente de transferencia de calor por convección se obtiene mediante el cálculo de los números adimensionales de *Nusselt* ( $Nu$ ) y de *Reynolds* ( $Re$ )

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k} \quad (E.1)$$

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} \quad (E.2)$$

donde  $D_h$  es el diámetro hidráulico,  $k$  es la conductividad del fluido,  $v$  es la velocidad y  $\nu$  es la viscosidad cinemática.

Primero, se calcula la velocidad como sigue

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_c}$$

$A_c$  es el área transversal de los tubos y  $\rho$  es la densidad del fluido.

El área del tubo interior es

$$A_{c_i} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,05 [m])^2 = 1,963 \cdot 10^{-3} [m^2]$$

Y el área del espacio anular

$$A_{c_o} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,1016 [m^2] - 0,052 [m^2]) = 5,98 \cdot 10^{-3} [m^2]$$

Con estos valores se calcula la velocidad

$$v_i = \frac{3,37 \left[\frac{kg}{s}\right]}{1.011,7 \left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot 1,963 \cdot 10^{-3} [m^2]} = 1,697 \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$v_o = \frac{2,37 \left[\frac{kg}{s}\right]}{782,85 \left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot 5,98 \cdot 10^{-3} [m^2]} = 0,5 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Luego se calcula el número de *Reynolds* (Ecuación E.2)

$$Re_i = \frac{1,697 \left[\frac{m}{s}\right] \cdot 0,05 [m]}{7,0921 \cdot 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s}\right]} = 119.685$$

El diámetro hidráulico de la sección anular es

$$D_o - D_i$$

$$Re_o = \frac{0,5 \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot (0,1016 [m] - 0,052 [m])}{1,6936 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m^2}{s} \right]} = 14.643$$

En ambos casos en número de *Reynolds* es mayor que 10.000, por lo que se tiene régimen turbulento.

Para el flujo turbulento completamente desarrollado el número de *Nusselt* puede calcularse según la siguiente ecuación

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (E.3)$$

Con  $n = 0,4$  para el calentamiento y  $n = 0,3$  para el enfriamiento del fluido que circula por el tubo. *Pr* es el número de *Prandtl* y se calcula como

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

Utilizando las propiedades de cada fluido

$$Pr_i = \frac{4,053 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot 1000 \left[ \frac{J}{kJ} \right] \cdot 7,175 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]}{0,6278 \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]} = 4,63$$

$$Pr_o = \frac{2,3885 \left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot 1000 \left[ \frac{J}{kJ} \right] \cdot 1,326 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \right]}{0,1268 \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]} = 24,97$$

Reemplazando los valores obtenidos para *Re* y *Pr* en la Ecuación E.3, se obtiene el número de *Nusselt*

$$Nu_i = 0,023 \cdot 119.685^{0,8} \cdot 4,63^{0,4} = 490,2$$

$$Nu_o = 0,023 \cdot 14.643^{0,8} \cdot 24,97^{0,3} = 129,9$$

Finalmente, de la Ecuación E.1 se puede despejar *h*

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h}$$

$$h_i = \frac{490,2 \cdot 0,6278 \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]}{0,05 [m]} = 6.154,9 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$h_o = \frac{129,9 \cdot 0,1268 \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]}{(0,1016 [m] - 0,052 [m])} = 332 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

## Resistencia de la pared

La resistencia térmica de la pared del tubo que separa ambos fluidos es

$$R_{pared} = \left(\frac{x_w}{k_w}\right) \cdot \left(\frac{D_o}{D_L}\right) \quad (E.4)$$

con

$$D_L = \frac{D_o - D_i}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}$$

y  $x_w$  el grosor de la pared.

$D_i$  y  $D_o$  son los diámetros interno y externo del tubo interior. De esta forma se tiene

$$D_L = \frac{0,052 [m] - 0,05 [m]}{\ln\left(\frac{0,052 [m]}{0,05 [m]}\right)} = 0,0509 [m]$$

$$R_{pared} = \left(\frac{0,002 [m]}{16,2 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]}\right) \cdot \left(\frac{0,052 [m]}{0,0509 [m]}\right) = 1,261 \cdot 10^{-4} [m^2 \cdot K/W]$$

## Factores de incrustación

Para el lado interior se utilizó un factor de incrustación  $R_{fi}$  igual a  $0,0002 [m^2 \cdot K/W]$  y para el lado exterior se usó  $R_{fo} = 0,000352 [m^2 \cdot K/W]$  ( $h_{di} = \frac{1}{R_{fi}}$  y  $h_{do} = \frac{1}{R_{fo}}$ ).

Luego, reemplazando todos los valores calculados anteriormente, se obtiene el valor de  $U_o$

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{0,052 [m]}{0,05 [m]}\right) \cdot 0,0002 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right] + \left(\frac{0,052 [m]}{0,05 [m]}\right) \cdot \left(\frac{1}{6.154,9 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]}\right) + 1,261 \cdot 10^{-4} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right] + \left(\frac{1}{332 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]}\right) + 0,000352 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right]}$$

$$U_o = 259 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$$

## Cálculo del área y largo del intercambiador de calor

$$\dot{Q} = U_o A_o \Delta T_{ml}$$

$$A_o = \frac{\dot{Q}}{U_o \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{471,579 \left[\frac{kJ}{s}\right] \cdot \frac{1000 [J]}{[kJ]}}{259 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right] \cdot 94,7 [^\circ C]} = 19,22 [m^2]$$

A partir del área y los diámetros del intercambiador se determina su largo

$$L = \frac{A_o}{\pi \cdot D_o} = \frac{19,22 [m^2]}{\pi \cdot 0,052 [m]} = 117,7 [m]$$

## 11.6 Anexo F. Correlaciones usadas en cálculos balances de energía

### Temperatura del cielo equivalente [18]

$$T_s = T_a \cdot [0,711 + 0,0056 \cdot T_{dp} + 0,000073 \cdot T_{dp}^2 + 0,013 \cdot \cos(15 \cdot t)]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{F.1})$$

donde:

- $T_s$ : temperatura del cielo equivalente [K]
- $T_a$ : temperatura ambiente [K]
- $T_{dp}$ : temperatura de punto de rocío [°C]
- $t$ : hora del día [h]

### Temperatura de punto de rocío [54]

$$T_{dp} = \frac{237,3 \cdot B}{1 - B} \quad (\text{F.2})$$

con

$$B = \frac{\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T}}{17,27}$$

donde:

- $T_{dp}$ : temperatura de punto de rocío [°C]
- $RH$ : humedad relativa [%]
- $T$ : temperatura del aire [°C]

### Presión de vapor de agua [55]

$$P_w = \exp\left(73,649 - \frac{7.258,2}{T} - 7,3037 \cdot \ln T + 4,1653 \times 10^{-6} \cdot T^2\right) \quad (\text{F.3})$$

donde:

- $P_w$ : presión de vapor [Pa]
- $T$ : temperatura [K]

### Coefficiente de transferencia de calor por convección al ambiente [18]

$$h = 2,8 + 3 \cdot v \quad (\text{F.4})$$

donde:

- $h$ : coeficiente de transferencia de calor [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]
- $v$ : velocidad del viento [m/s]

## 11.7 Anexo G. Estimación de costos

### G.1. Estimación costos de inversión campo solar

Tabla 11.5. Costos incluidos en las distintas categorías de costos de inversión del campo solar.

<b>Costos de inversión directos</b>	
<b>Preparación del sitio</b>	Representa costos relacionados a las mejoras al sitio necesarias para la instalación de la planta, así como algunos equipos no incluidos en la categoría “Campo solar”.
<b>Campo solar</b>	Representa el costo de los colectores solares, es decir, incluye los reflectores, receptores, estructura de soporte, sistema de seguimiento, sistema eléctrico, entre otros. Contempla, además, la mano de obra asociada a su instalación. La estimación incluida en SAM asume un volumen de producción de 1.500 colectores de 656 [m <sup>2</sup> ] cada uno, construidos e instalados en Estados Unidos.
<b>Sistema fluido térmico</b>	Costos asociados a la compra e instalación de piping y bombas para el fluido de transferencia de calor.
<b>Contingencias</b>	Es un porcentaje de la suma de los costos directos que representa incertidumbres en su estimación.
<b>Costos de inversión indirectos</b>	
<b>EPC y costos del dueño</b>	Los costos de ingeniería, aprovisionamiento y construcción (EPC, por sus siglas en inglés) y costos del dueño están asociados al diseño y construcción del proyecto. Ejemplos de costos que se incluyen en esta categoría son permisos, derechos de autor, consultorías, gastos legales, mediciones ambientales y geotécnicas, actividades de ingeniería y desarrollo de proyectos por parte del dueño, entre otros.
<b>Costo total del terreno</b>	Costos asociados a la compra del terreno.

### G.2. Estimación costos de inversión intercambiador de calor

La correlación dada por la Ecuación G.1 permite estimar el costo de compra de este equipo en función su área de transferencia de calor [57].

$$C = 1.096 \cdot f_m \cdot f_p \cdot A^{0,18} \quad (G.1)$$

donde:

- $C$ : Costo del equipo [USD]
- $A$ : área de transferencia [ft<sup>2</sup>]

El factor  $f_m$  se asocia al material del equipo. En este caso se considera acero inoxidable 316L, por lo que toma un valor igual a 2,2. Por su parte, el factor  $f_p$  se asocia a la presión de operación,

tomando un valor igual a la unidad. Luego, reemplazando en la Ecuación G.1 y con un área igual a 206,7 [ft<sup>2</sup>], se tiene

$$C_{2003} = 1.096 \cdot 2,2 \cdot 1 \cdot 206,7^{0,18} = 6.295 \text{ [\$USD]}$$

Este costo corresponde al año 2003, por lo que se actualiza mediante el uso de índices, según la Ecuación G.2

$$C_t = C_0 \cdot \left(\frac{I_t}{I_0}\right) \quad (\text{G.2})$$

donde:

- $t$ : año para el que se va a estimar el costo
- $C_t$ : costo estimado para el año  $t$
- $C_0$ : costo en el año de referencia
- $I_t$ : índice del año  $t$
- $I_0$ : índice del año de referencia

En este caso se utiliza el índice CEPCI para los años 2003 ( $I_0$ ) y 2015 ( $I_t$ ). Se usó este último ya que no se cuenta con uno representativo del año 2016 [58,59]. Reemplazando los valores correspondientes en la Ecuación G.2, se obtiene el costo de compra actualizado

$$C_{2015} = 6.295 \text{ [\$USD]} \cdot \left(\frac{556,8}{401,7}\right) = 8.726 \text{ [\$USD]}$$

Finalmente, aplicando los factores correspondientes a los demás ítems que se consideran dentro del costo de inversión total, mostrados en la Tabla 11.6, se obtiene el costo total de intercambiador de calor.

**Tabla 11.6.** Detalle de los costos de inversión del intercambiador de calor.

Ítem	Porcentaje asumido del costo de inversión total [%]*	Costo [\\$USD]
<b>Costos directos</b>		
<b>Compra de equipos</b>	40	8.726
<b>Instalación de equipos</b>	10	2.181,5
<b>Instrumentación y control</b>	5	1.090,75
<b>Piping</b>	11	2.399,65
<b>Servicios eléctricos</b>	6	1.308,9
<b>Edificaciones</b>	-	-

<b>Mejoras al sitio</b>	3	654,45
<b>Instalaciones de servicio</b>	-	-
<b>Terreno</b>	-	-
<b>Total costos directos</b>		16.359,3
<b>Costos indirectos</b>		
<b>Ingeniería y supervisión</b>	12	2.617,8
<b>Gastos de construcción</b>	10	2.181,5
<b>Pago contratistas</b>	4	872,6
<b>Contingencias</b>	15	3.272,25
<b>Total costos indirectos</b>		8.944,15
<b>Costo de inversión total</b>		<b>25.305</b>

\*Para la mayoría de los ítems se asume un valor medio para el rango propuesto, excepto para compra de equipos y contingencias, en que se asume el valor máximo. No se consideran costos de edificación, terreno ni instalaciones de servicio.

### G.3. Estimación costos de inversión destilador

Para la estimación del costo de inversión asociado al destilador se consideró una piscina similar a las de acumulación existentes en el relleno. Se trata de una piscina trapezoidal, con un área superior igual a la obtenida del dimensionamiento ( $A_b = 4.471 \text{ [m}^2\text{]}$ ) y un área inferior correspondiente al 70% de este valor. Además, se asumió una profundidad de 50 [cm]. Con estos supuestos y el costo por metro cúbico de construcción de una piscina —dato entregado por la empresa— se obtiene un costo de inversión de 4.336 [USD]. A este monto se debe sumar el costo de la cubierta. Éste se estimó en base a una cotización de un vidrio con bajo contenido de hierro que le otorga una alta transparencia, cuyo precio es de 13.409 [CLP/m<sup>2</sup>] [60]. En la Tabla 11.7 se resume lo expuesto anteriormente.

**Tabla 11.7.** Costo de inversión destilador solar.

<b>Ítem</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Valor magnitud</b>	<b>Costo [USD] *</b>
<b>Piscina (bandeja)</b>	1.560 [CLP/m <sup>3</sup> ] **	1.890 [m <sup>3</sup> ]	4.336
<b>Cubierta de vidrio</b>	13.409 [CLP/m <sup>2</sup> ]	4.740 [m <sup>2</sup> ]	93.373
<b>Total</b>			97.709

\*Se asume el promedio del valor del dólar observado hasta septiembre de 2016 [61].

\*\*Considera costos directos e indirectos.

Para el cálculo del volumen se utiliza la siguiente ecuación

$$V = \frac{1}{3} \cdot h \cdot \left( A_{inf} + A_{sup} + \sqrt{A_{inf} \cdot A_{sup}} \right)$$

donde:

- $V$ : volumen [m<sup>3</sup>]
- $h$ : altura [m]
- $A_{inf}$ : área inferior [m<sup>2</sup>]
- $A_{sup}$ : área superior [m<sup>2</sup>]

#### G.4. Estimación costos de operación

Para la estimación de estos costos se consideró el costo total de operación de la planta de tratamiento actual, descontando los costos asociados a la recirculación (corresponde a la operación de una flota de camiones), a la mano de obra y a la energía eléctrica; este último ítem representa el principal costo asociado al tratamiento biológico. Así, se puede estimar el costo por metro cúbico de lixiviado tratado. Luego, considerando el volumen anual de lixiviados a tratar con la nueva alternativa, se obtiene el costo de operación anual, al que se suma la mano de obra (exclusiva de esta etapa adicional) y el lavado de los espejos reflectores. Así, el detalle se muestra en la Tabla 11.8.

**Tabla 11.8.** Estimación costos de operación.

Ítem	Costo [\$CLP/año]
<b>Costo de operación sistema de tratamiento actual</b>	561.574.000
<b>-Mano de obra</b>	-280.289.000
<b>-Energía eléctrica</b>	-80.500.000
<b>-Operación flota</b>	-96.483.000
<b>Total</b>	104.302.000 (476[\$CLP/m <sup>3</sup> ])
<b>Costo anual para sistema de tratamiento propuesto</b> (en base a 120 [m <sup>3</sup> /día] y al costo por metro cúbico)	20.563.000
<b>+Mano de obra (dos operarios)</b>	+23.352.000
<b>+Lavado espejos*</b>	+70.800
<b>Costo de operación total</b>	<b>43.985.800</b> (64.619 [\$USD]) **

\*Considera un consumo de 0,7 [L/m<sup>2</sup>] y 63 lavados al año, de acuerdo a SAM.

\*\*Se asume el promedio del valor del dólar observado hasta septiembre de 2016 [61].

## **11.8 Anexo H. Flujo de caja**

### **Supuestos**

- Horizonte de evaluación de 15 años, de acuerdo a la vida útil considerada para equipos como el intercambiador y la piscina [62].
- Crédito a 10 años por un 70% del costo de inversión fija, con cuota fija y tasa de interés del 6%. Esta última según recomendación de la empresa (detalle de flujos en Tabla G.6).
- Ingresos y costos de operación (OPEX) se consideran constantes en el tiempo.
- Depreciación acelerada, es decir, la cuota se calcula como el cociente entre el costo de compra y un tercio de la vida útil.
- Se asume un valor residual igual al 70% del costo de compra.
- Capital de trabajo igual a los gastos de operación correspondientes a dos meses.
- No se consideran reinversiones.

**Tabla 11.9.** Flujo de caja del proyecto con financiamiento. Valores expresados en dólares [\$USD].

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>Ingresos (+)</b>																
Ahorro recirculación		29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632	29632
Ahorro agua potable		34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652	34652
<b>OPEX (-)</b>		-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619	-64619
Intereses por crédito (-)		-14429	-13334	-12174	-10944	-9640	-8258	-6793	-5240	-3594	-1849	0	0	0	0	0
Depreciaciones (-)		-46657	-46656	-46656	-46656	-46656	-22054	-22054	-22054	-22054	-22054	0	0	0	0	0
<b>Ganancias/pérdidas de capital (+/-)</b>																103065
Pérdidas de ejercicios anteriores (-)			-61421	-121746	-180911	-238846	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Utilidad antes de impuestos (=)		-61421	-121746	-180911	-238846	-295477	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Impuesto (20%) (-)		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Utilidad después de impuestos (=)		-61421	-121746	-180911	-238846	-295477	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Depreciaciones (+)		46657	46656	46656	46656	46656	22054	22054	22054	22054	22054	0	0	0	0	0
<b>Ganancias/pérdidas de capital (-/+)</b>																-
Pérdidas de ejercicios anteriores (+)			61421	121746	180911	238846	295477	326124	355306	382935	408918	433156	433491	433826	434161	434496
<b>FLUJO DE CAJA OPERACIONAL (=)</b>		-14764	-13669	-12509	-11279	-9975	-8593	-7128	-5575	-3929	-2184	-335	-335	-335	-335	-335
Inversión (-)	-343551															
IVA de la inversión (-)	-65275															
Recuperación IVA de la inversión (+)		65275														
<b>Valor residual de los activos (+)</b>																103065
Capital de trabajo (-)	-10770															
Recuperación del capital de trabajo (+)																10770
Préstamos (+)	240486															
Amortizaciones (-)		-18245	-19340	-20500	-21730	-23034	-24416	-25881	-27434	-29080	-30825					
<b>FLUJO DE CAPITALES (=)</b>	-179110	47030	-19340	-20500	-21730	-23034	-24416	-25881	-27434	-29080	-30825	0	0	0	0	113835
<b>FLUJO DE CAJA (=)</b>	<b>-179110</b>	<b>32266</b>	<b>-33009</b>	<b>-335</b>	<b>-335</b>	<b>-335</b>	<b>-335</b>	<b>113500</b>								

**Tabla 11.10.** Flujos asociados al financiamiento.

<b>Período</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Deuda inicial [\$USD]</b>	240486	222241	202901	182400	160670	137636	113220	87339	59905	30825
<b>Cuota [\$USD]</b>	32674	32674	32674	32674	32674	32674	32674	32674	32674	32674
<b>Interés [\$USD]</b>	14429	13334	12174	10944	9640	8258	6793	5240	3594	1849
<b>Amortización [\$USD]</b>	18245	19340	20500	21730	23034	24416	25881	27434	29080	30825
<b>Deuda final [\$USD]</b>	222241	202901	182400	160670	137636	113220	87339	59905	30825	0

**Tabla 11.11.** Flujos asociados a depreciaciones, valor residual y ganancia y/o pérdida de capital.

<b>Equipo</b>	<b>Valor compra [\$USD]</b>	<b>Vida útil</b>	<b>Valor residual [\$USD]</b>	<b>Depreciación anual [\$USD]</b>	<b>Depreciación acumulada (15 años) [\$USD]</b>	<b>Valor libro [\$USD]</b>	<b>Ganancia/pérdida de capital [\$USD]</b>
<b>Campo Solar</b>	220537	30	66161,1	22053,7	220537	0	66161,1
<b>Intercambiador de calor</b>	25305	15	7591,5	5061	25305	0	7591,5
<b>Destilador</b>	97709	15	29312,7	19541,8	97709	0	29312,7
<b>Total</b>	343551	-	103065,3	46656,5	-	-	103065,3