



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO – CHILE

**“EVALUACIÓN TÉCNICO-
ECONÓMICA DE COSECHA DE AGUA
ATMOSFÉRICA EN ZONAS
SEMIÁRIDAS PARA DESTINAR A
PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE BAJO
CONSUMO DE AGUA”**

Presentado por

FELIPE ANDRÉS GUAJARDO OJEDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL QUÍMICO

Profesora guía: Dra. Paula Guerra

Profesor Correferente: Dr. Iván Cornejo

SEPTIEMBRE 2023

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional en mi etapa universitaria y en todos los desafíos que me he enfrentado. Muchas gracias, Los amo.

A mi perro Jack, gracias por llegar a alegrarme la vida y por tu compañía.

A mis amigos del colegio, los que conozco de toda la vida, Diaz, Jorratt, Nelson, Colombo y Nico.

A mis amigos que conocí en la universidad y tomamos rumbos diferentes, Max y Dani. Gracias amigos por ayudar a despejarme y siempre sacarme una sonrisa en los momentos más duros.

A mis amigas de la U, Fer, Nicole y Belén, por acompañarme en este largo camino universitario, por todas las jornadas extensas de estudio vividas estos años de carrera. Gracias por hacer de la universidad un lugar el cual disfrutaba.

A mi polola Catalina, agradecido de que me acompañes esta última etapa universitaria y de haber conocido una persona tan espectacular como tú. Te amo.

A mi profesora guía Paula Guerra, muchas gracias por su ayuda en la confección de mi trabajo de tesis y por estar siempre disponible para cualquier duda que tuviese. Un placer ser su memorista.

RESUMEN EJECUTIVO

El cambio climático experimentado por el planeta ha provocado una disminución de las fuentes de extracción de agua dulce debido al déficit de precipitaciones y desertificación de los suelos. Particularmente en Chile se ha experimentado una mega sequía, generando la necesidad urgente de avanzar hacia una mejor gestión del agua y la búsqueda de nuevas fuentes de este recurso. En esta línea, se propone la utilización de tecnologías de cosecha de agua atmosférica, que permite recolectar el agua presente en la atmósfera como vapor de agua, no afectando al medio ambiente ni consumiendo ningún tipo de recurso hídrico convencional a diferencia de los métodos existentes. Considerando el contexto de sequía a nivel nacional, se seleccionó la comuna de La Ligua en la provincia de Petorca en la V región de Chile, ya que es la más afectada por este fenómeno. El cultivo seleccionado fue la tuna (*Opuntia ficus-índica*) debido a sus características resistivas a la sequía y su bajo requerimiento hídrico. La demanda objetivo a suministrar considerando las condiciones meteorológicas de entrada del aire, el requerimiento hídrico de la tuna y el catastro frutícola de la comuna es de 2 m³ diarios.

Se compara cualitativa y cuantitativamente las distintas tecnologías de captación de agua atmosférica siendo la más adecuada para la zona de estudio y capaz de suministrar la demanda establecida la tecnología por captación activa mediante el método de ciclo de compresión de vapor (VCC).

Se realiza un análisis técnico económico a la tecnología seleccionada donde se obtuvo que para abarcar el requerimiento diario de agua de 2 m³ se necesita un flujo de aire seco y de refrigerante de 40.171 kg/h y 3.856 kg/h respectivamente, con una potencia máxima del sistema de 46 kW. En cuanto a la evaluación económica se estima un CAPEX Y OPEX del proyecto correspondiente a 141.960 USD y 18.168 USD respectivamente. Se determina que el mejor escenario para este proyecto es mediante financiamiento externo del 60% de la inversión inicial con crédito a largo plazo obteniéndose así un VAN de 88.103 USD, un TIR de 38,3% y un payback a los 3 años.

La evaluación permite ver la prefactibilidad de la implementación de esta tecnología, logrando ser positiva técnica y económicamente mediante las condiciones descritas.

ABSTRACT

The climate change experienced by the planet has caused a decrease in the sources of freshwater extraction due to the deficit of precipitation and desertification of soils. Particularly in Chile, a context of mega drought has been experienced, generating the urgent need to advance in a better water management and to look for new sources of this resource. In this line, the use of atmospheric water harvesting technologies is proposed, which allows collecting the water present in the atmosphere as water vapor, without affecting the environment or consuming any type of conventional water resource, as opposed to the existing methods. Considering the drought context at the national level, the commune of La Ligua in the province of Petorca in V region was selected, since it is the most affected by this phenomenon. The selected crop was prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) due to its drought-resistant characteristics and its low water requirement. The target demand to be supplied considering the meteorological conditions of air entry, the water requirement of the prickly pear and the fruit cadaster of the commune is 2 m³ per day.

A qualitative and quantitative comparison was made of the different atmospheric water harvesting technologies, the most suitable for the study area and capable of supplying the established demand being the active cooling technology using the vapor compression cycle (VCC) method.

A technical-economic analysis of the selected technology was carried out, which showed that to cover the daily water requirement of 2 m³, a flow of dry air and refrigerant of 40,171 kg/h and 3,856 kg/h, respectively, was required. With a maximum system power of 46 kW. Regarding the economic evaluation, the CAPEX and OPEX of the project were estimated at USD 141,960 and USD 18,168, respectively. It was determined that the best scenario for this project is through external financing of 60% of the initial investment with long-term credit, thus obtaining an NPV of 88,103 USD, an IRR of 38.3% and a payback after 3 years. The evaluation showed the pre-feasibility of implementing this technology, making it technically and economically positive under the conditions describe

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Contexto Global	9
1.2. Contexto Nacional.....	10
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo general.....	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
2.3. Alcance	17
3. MARCO TEÓRICO.....	19
3.1. Análisis de sitio de estudio	19
3.1.1. Análisis de cuencas.....	22
3.1.1.1. Cuenca río Petorca	23
3.1.1.2. Cuenca río La Ligua.....	24
3.1.1.3. Cuenca río Aconcagua.....	25
3.2. Análisis de tecnologías para recolección de agua.....	26
3.2.1. Tecnologías de recolección de agua	26
3.2.1.1. Captación de agua de lluvia	26
3.2.1.2. Captación de agua de fuentes subterráneas	26
3.2.1.3. Desalinización	27
3.2.1.4. Reutilización de aguas residuales.....	28
3.2.2. Cosecha de agua atmosférica	29
3.2.2.1. Captación activa	30
□ Ciclo de compresión de vapor (VCC)	32

<input type="checkbox"/> Refrigeración termoeléctrica (TEC).....	34
3.2.2.2. Captación pasiva	35
<input type="checkbox"/> Cosecha de niebla.....	35
<input type="checkbox"/> Cosecha de rocío	36
3.2.2.3. Concentración de vapor.....	37
<input type="checkbox"/> Sorción.....	37
<input type="checkbox"/> Membrana selectiva.....	38
3.2.2.4. Comparación de tecnologías	39
3.2.2.5. Proyección tecnologías AWG.....	40
4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	42
5. ESTUDIO TÉCNICO	44
5.1. Selección de variables	44
5.1.1. Selección de localidad y cultivo agrícola.....	44
5.1.2. Selección de tecnología.....	47
5.2. Descripción del proceso	48
5.3. Demanda por abarcar	50
5.4. Fluidos utilizados	51
5.4.1. Aire atmosférico	51
5.4.2. Refrigerante.....	52
5.5. Equipos utilizados	53
5.5.1. Especificaciones técnicas ciclo de enfriamiento	54
5.5.2. Especificaciones técnicas compresor.....	54
5.5.3. Especificaciones técnicas ventilador	55
5.5.4. Especificaciones técnicas tanque de almacenamiento	55
5.5.5. Especificaciones técnicas dimensiones tecnología.....	55
5.6. Diagrama de flujo.....	56

5.7. Balance de masa y energía.....	57
5.8. Potencia requerida.....	63
5.9. Análisis de resultados.....	64
6. ESTUDIO ECONÓMICO.....	65
6.1. Bases de evaluación económica.....	65
6.2. Estructura de egresos e ingresos del proyecto.....	65
6.2.1. Estructura de egresos del proyecto.....	65
6.2.1.1. Costos de servicios.....	65
6.2.1.2. Costos de refrigerante.....	67
6.2.1.3. Costos de equipos.....	67
6.2.1.4. Gastos de capital (CAPEX).....	68
6.2.1.5. Gastos de operación (OPEX).....	69
6.2.2. Estructura de ingresos del proyecto.....	70
6.3. Depreciación de equipos utilizados.....	72
6.4. Amortización.....	72
6.5. Escenarios flujo de caja.....	73
6.6. Evaluación de indicadores.....	73
6.7. Análisis de resultados.....	74
7. CONCLUSIONES.....	76
8. REFERENCIAS.....	77
9. ANEXOS.....	81
9.1. ANEXO A: Cálculo propiedades psicrométricas aire.....	81



9.2.	ANEXO B: Diagrama de Mollier del refrigerante R134a.....	82
9.3.	ANEXO C: Parámetros costos de equipos	82
9.4.	ANEXO D: Flujo de caja escenario 1	84
9.5.	ANEXO E: Flujo de caja escenario 2.....	85
9.6.	ANEXO F: Flujo de caja escenario 3	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Parámetro global de estrés hídrico (MMA, 2021)	10
Figura 2: Gráfico de Número de decretos entre el período 2008-2022 (DGA, 2023).....	11
Figura 3: Distribución de decretos de escasez hídrica por región (DGA, 2023).....	12
Figura 4: Distribución demanda consuntiva de agua a nivel nacional en Mm ³ /año (MOP, 2017).	13
Figura 5: Mapa hidrográfico de la región de Valparaíso (Gobierno Regional Región de Valparaiso, 2022).....	22
Figura 6: Variables meteorológicas mensuales proyectadas comuna de Petorca (MeteoBlue, 2022).	23
Figura 7: Variables meteorológicas mensuales proyectadas comuna de La Ligua (MeteoBlue, 2022).....	24
Figura 8: Variables meteorológicas mensuales proyectadas comuna de Quillota (MeteoBlue, 2022).....	25
Figura 9: Esquema captación de agua de lluvia (CEPIS, 2004).....	26
Figura 10: Esquema captación aguas subterránea (Pozos profundos S.A., 2023).....	27
Figura 11: Esquema desalinización RO (Ecología verde, 2020).....	27
Figura 12: Esquema de método de recolección de aguas residuales (María Verdeguer Pérez, 2018)	28
Figura 13: Tecnologías de recolección de agua atmosférica (Raveesh G, 2023).....	29
Figura 14: Relación Temperatura y HR con volumen de aire necesario para tecnología VCC (Barry L. Spletzer, 2001).....	31
Figura 15: Proceso de deshumidificación del aire en carta psicrométrica	31
Figura 16: Diagrama de bloque del proceso de ciclo de compresión, Refrigeración activa (Farshid Bagheri, 2018)	32
Figura 17: Deshumidificación de aire mediante refrigeración activa por método de compresión de vapor (Abhishek Dash, 2022)	33
Figura 18: Diagrama de refrigeración termoeléctrica (Casallas, 2021)	34
Figura 19: Esquema de cosecha de agua atmosférica con atrapanieblas (bay side fog collectors, 2023)	36

Figura 20: Esquema de cosecha de rocío (R Ziatdinov, 2019).....	37
Figura 21: Mecanismo de funcionamiento basado en método de sorción (M Ejeian, 2021)37	
Figura 22: Esquema de funcionamiento membrana condensadora (Macedonio F, 2017)...	38
Figura 23: Proyección mercado de AWG hasta 2032 (MUSD) (Precedence research, 2023)	40
Figura 24: Distribución continental del mercado de tecnologías AWG (Precedence research, 2023).....	41
Figura 25: Distribución de superficie cultivada de tuna en comunas de estudio (Ministerio de agricultura, 2020)	46
Figura 26: Tasa de captación de agua de tecnologías de captación activa (Peeters, 2020) .	48
Figura 27: PFD Proceso de captación de agua atmosférica mediante ciclo de compresión	56
Figura 28: Distribución de gastos de inversión (CAPEX)	69
Figura 29: Distribución de costos de operación (OPEX).....	70
Figura 30: Carta psicrométrica de flujo de aire en el evaporador del ciclo de compresión .	81
Figura 31: Diagrama de Mollier de refrigerante R134a indicando cada etapa del proceso .	82
Figura 32: Flujo de caja sin financiamiento parte 1.....	84
Figura 33: Flujo de caja sin financiamiento parte 2.....	84
Figura 34: Flujo de caja con financiamiento LP parte 1	85
Figura 35: Flujo de caja con financiamiento LP parte 2	85
Figura 36: Flujo de caja con financiamiento CP parte 1	86
Figura 37: Flujo de caja con financiamiento CP parte 2.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Balance hídrico proyectado por región (Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile, 2015)	15
Tabla 2: Superficie V región y nacional por especie (Ministerio de agricultura, 2020).....	20
Tabla 3: Superficie V región y nacional hortícola por especie. (ODEPA, 2022).....	21
Tabla 4: Superficie V región y nacional de cultivos anuales por especie (ODEPA, 2022).	21
Tabla 5: Comparación de las distintas tecnologías de captación de agua atmosférica.....	39
Tabla 6: Datos meteorológicos de comunas analizadas de la región de Valparaíso (MeteoBlue, 2022)	44
Tabla 7: Distribución de superficies de cultivo en las comunas en estudio	45
Tabla 8: Requerimiento hídrico anual de cultivos frutícolas por hectárea de cultivo (Ministerio de agricultura, 2020)	46
Tabla 9: Resultados obtenidos para abarcar demanda de tuna	51
Tabla 10: Condiciones de entrada y salida de aire seco al proceso	51
Tabla 11: Ficha técnica gas refrigerante R134a (Gasservei, 2023)	52
Tabla 12: Descripción de equipos involucrados en el proceso.....	53
Tabla 13: Parámetros tecnología AWG (AWG Australia, 2023).....	54
Tabla 14: Parámetros compresor (Cenfrico, 2023).....	54
Tabla 15: Parámetros ventilador (ALG, 2023).....	55
Tabla 16: Parámetros tanque de almacenamiento (BioPlastic, 2023).....	55
Tabla 17: Dimensiones tecnología de ciclo de compresión sin tanque de almacenamiento	55
Tabla 18: Variables de flujo de refrigerante R134a dentro del sistema VCC	56
Tabla 19: Variables del aire a la entrada y salida	56
Tabla 20: Flujos máxicos y volumétricos de las corrientes involucradas en el proceso de captación de agua atmosférica.....	57
Tabla 21: Potencia máxima consumida por equipos.....	63
Tabla 22: Bases evaluación económica.....	65
Tabla 23: Tarifa suministro eléctrico CGE (CGE, 2023)	66
Tabla 24: Tarifa precios sistemas FV (Ministerio de energía, 2020)	66
Tabla 25: Diferencia anual entre las fuentes de consumo eléctrico analizadas para el	

proyecto.....	67
Tabla 26: Estimación inversión para compra de equipos de proceso	68
Tabla 27: Estimación inversión inicial del proyecto (CAPEX) (Max S.Peters, 2003).....	68
Tabla 28: Razones técnicas de costos operacionales del proyecto.....	69
Tabla 29: Estimación gastos de operación (OPEX).....	70
Tabla 30: Ingresos anual establecido por uso de tecnología AWG.....	71
Tabla 31: Ingreso anual de agua para uso agrícola.....	71
Tabla 32: Ingresos totales al año 1.....	71
Tabla 33: Depreciación lineal y acelerada de equipos del proceso (SII, 2003)	72
Tabla 34: Parámetros para flujo de caja con financiamiento	72
Tabla 35: Escenarios propuestos para evaluación económica del proyecto.....	73
Tabla 36: Indicadores económicos para distintos escenarios del proyecto.....	73

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto Global

De acuerdo con el último reporte realizado por las Naciones Unidas sobre el desarrollo y evolución de los recursos hídricos, se estima que más de 4 mil millones de personas no tienen acceso a agua potable en al menos un mes del año. Esto se espera que aumente en las próximas décadas, ya que se espera que el consumo mundial de agua aumente en un 1% al año. En consecuencia, se estima que en el año 2050 más de la mitad de la población mundial se enfrentará a un grave estrés hídrico (Naciones Unidas, 2023).

Con la creciente población mundial se genera una necesidad de conciliar la competencia entre las demandas comerciales de los recursos hídricos para que las comunidades tengan lo suficiente para satisfacer sus necesidades. Los cambios en la demanda del agua agrícola están entre los más difíciles de predecir. Partiendo de un escenario en el que las actividades industriales se continúen de forma habitual, la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas estima que el mundo necesitará alrededor de un 60% más de alimentos para el año 2050, y que la producción de alimentos de regadío aumentará por encima del 50% durante el mismo período (FAO, 2023).

Históricamente, el agua ha sido utilizada para satisfacer las necesidades de abastecimiento doméstico y las actividades productivas básicas como la agricultura y la ganadería, sin embargo, las consecuencias de la sequía han afectado en aspectos fundamentales como la salud, servicios básicos, tales como, agua potable, alimentación, economía, vivienda segura y áreas verdes, entre otros.

Actualmente, el mundo se encuentra enfrentando una triple crisis ambiental que contempla tres pilares importantes para el desarrollo humano, el cambio climático, la contaminación y la pérdida de biodiversidad. A pesar de que cada uno de ellos tiene sus propias causas, las consecuencias son las mismas, amenazando tanto a los ecosistemas como a la calidad de vida de las personas. Esto origina un gran desafío para la gestión ambiental a escalas tanto globales, como locales, en particular para países tan vulnerables al cambio climático como lo es Chile (SEA, 2023).

Entre una población en constante crecimiento y un clima cambiante, el estrés hídrico, y por lo tanto el riesgo de la disponibilidad del agua, está aumentando en todo el mundo, ya que

es un fenómeno de consecuencias irreversibles y diversas que afecta a casi todo el mundo. Este sombrío panorama ha llevado a la comunidad científica y sistemas reguladores a ejercer una mayor gestión en los derechos del agua y buscar fuentes alternativas de producción de agua potable (BCN, 2018).

En la Figura 1 se ve el rango del estrés hídrico mundial, donde se aprecia que en el Sudeste asiático y África del Norte son los más afectados por la escasez de agua, en cuanto al continente América, Chile y México son los países con la mayor vulnerabilidad al estrés hídrico (MMA, 2021).

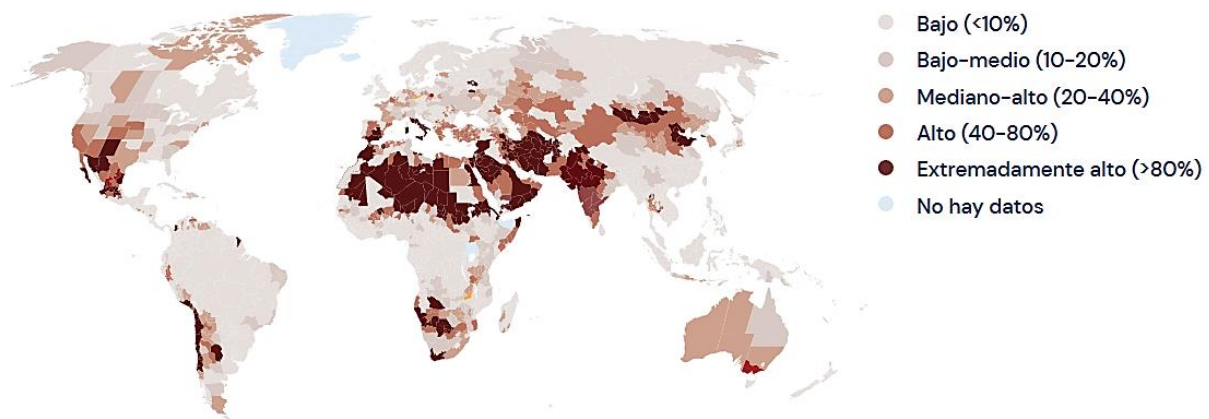


Figura 1: Parámetro global de estrés hídrico (MMA, 2021)

1.2. Contexto Nacional

Chile, a lo largo de la historia no ha sido inmune a esta amenaza climática, se destaca la sequía de los años 1968, 1998 y la que se vive en la actualidad, la cual mostró sus primeros estragos 2010, siendo esta última la que más ha afectado en cuanto al deterioro del medio ambiente y del recurso hídrico, atravesando un contexto de mega sequía provocando un déficit de precipitaciones en comparación al promedio histórico de al menos la mitad en todas las regiones del país.

A nivel nacional, en el presente año 2023, el 37% de las comunas del país se encuentran bajo decretos de escasez hídrica declarados por el Ministerio de Obras Públicas. Este escenario provoca graves impactos en las comunidades rurales, sus economías locales y los ecosistemas afectando alrededor de 6,4 millones de personas a lo largo de todo el País (DGA, 2023).

Los decretos de escasez hídrica se dictan para proveer herramientas a usuarios del agua y a la población en general para minimizar los daños derivados de la sequía. Da atribuciones a la Dirección General de Aguas, para establecer criterios y delimitaciones para las autorizaciones de extracción de aguas.

En cuanto a la incidencia de los números de decretos de escasez hídrica emitidos, el año 2020, se registró una emisión de 33 decretos, en su mayoría a comunas ubicadas en la Región Metropolitana y la Región de Valparaíso. La emisión de estos decretos realizados con el fin de proteger y gestionar de mejor forma el recurso hídrico de la zona han aumentado considerablemente los últimos años.

En la Figura 2, se presenta el número de decretos de escasez hídrica emitidos en Chile por año en el período de 2008 a 2022, donde desde el año 2016 se puede apreciar un aumento de los decretos emitidos en el País, lo que se explica por el creciente estrés hídrico nacional (DGA, 2023).

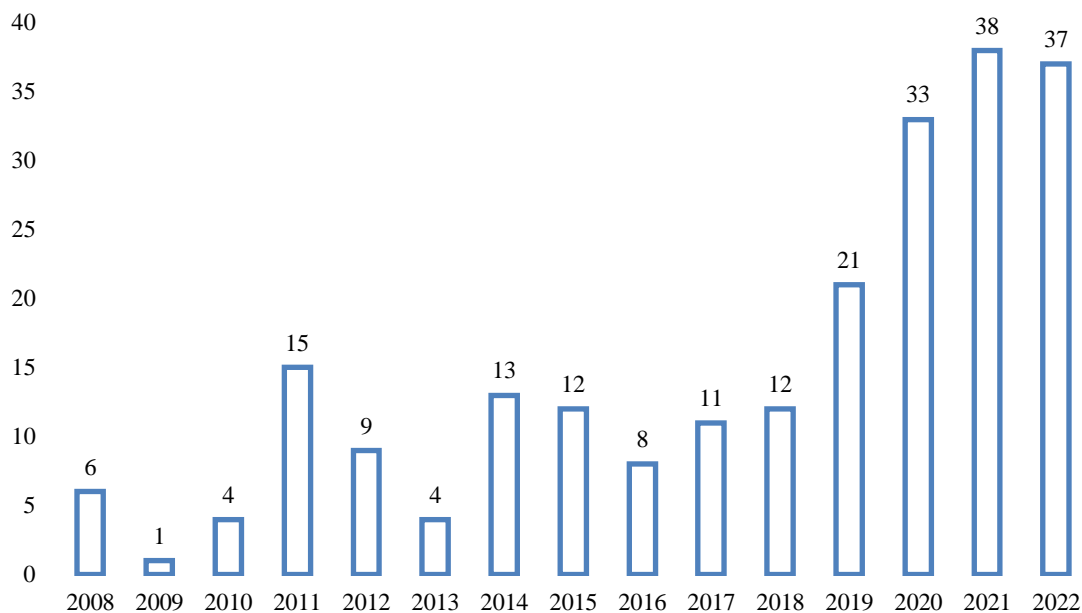


Figura 2: Gráfico de Número de decretos entre el período 2008-2022 (DGA, 2023)

Hay casos particulares en los que la situación hídrica es más crítica que en el resto de Chile, como es el caso de la región de Valparaíso, la cual presenta el mayor porcentaje de comunas con decreto de escasez hídrica en todo el país, además presenta las primeras cuencas que están bajo este decreto que son las cuencas Río La Ligua y Río Petorca.

En la Figura 3 se puede apreciar que casi el 30% de las comunas con decreto de escasez hídrica se encuentran en la región de Valparaíso, seguido de la región Metropolitana y Ñuble.

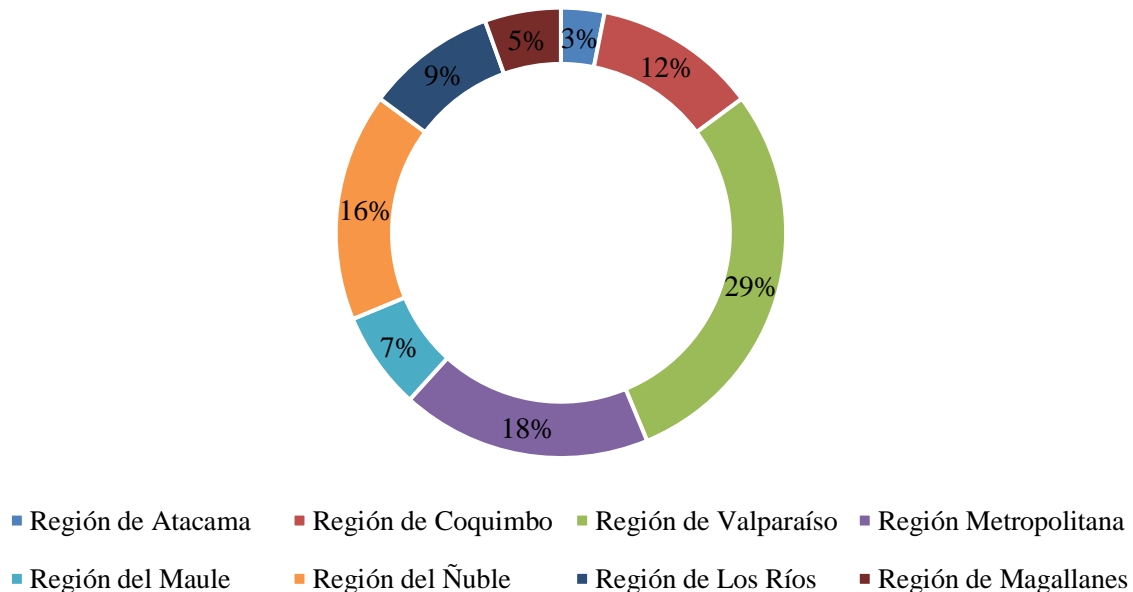


Figura 3: Distribución de decretos de escasez hídrica por región (DGA, 2023)

Estos datos presentados dan cuenta de la gran problemática presente en la región sobre todo en las comunas alejadas de la costa, las cuales están gravemente afectadas debido a la disminución de la principal actividad productiva de la zona que es la agricultura debido a esta escasez de agua. Por lo que se tienen que tomar decisiones y planes para poder apaciguar o revertir esta creciente crisis hídrica.

Las principales actividades de uso consuntivo del recurso hídrico a nivel nacional están concentradas en la actividad agrícola que corresponde a un 72 %, en la industria minera e industrial con un 18 %.

La distribución del recurso hídrico consuntivo se presenta en la Figura 4 donde se ve de manera más clara la predominancia de la agricultura en cuanto a la utilización de grandes cantidades de agua debido a la variedad de cultivos y especies.

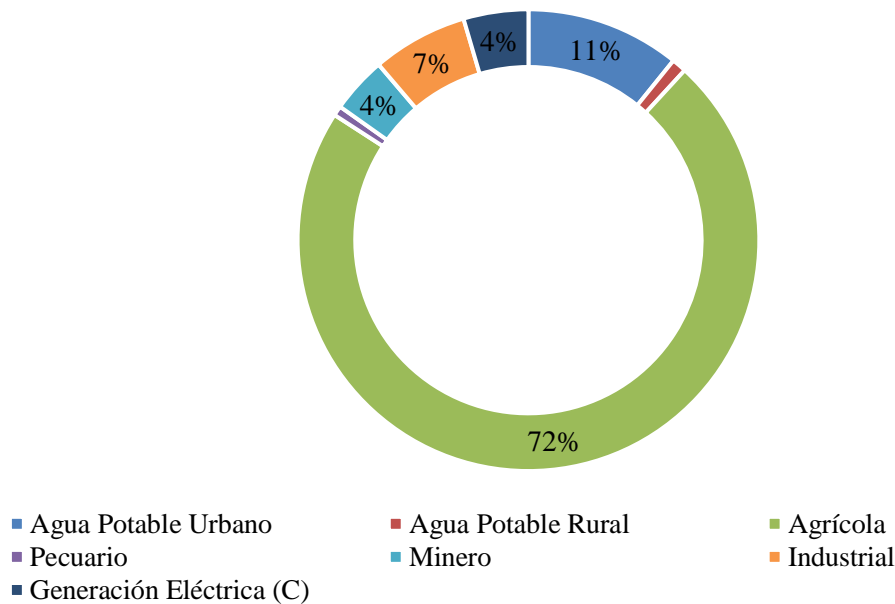


Figura 4: Distribución demanda consuntiva de agua a nivel nacional en $Mm^3/año$ (MOP, 2017).

Este tipo de rubros, además de ser muy demandantes de agua en su funcionamiento, generan gran impacto debido a los efectos contaminantes que se genera en las cuencas durante sus procesos productivos, además del deterioro de la capacidad de retención de agua en los suelos. La sequía ha repercutido sobre todo en la región de Valparaíso en la totalidad de su territorio haciendo que el gobierno implemente estrategias para combatir esta escasez hídrica, ya que este fenómeno ha afectado a la mayoría de las actividades productivas de la región restringiendo el desarrollo de estas (MOP, 2017).

En el caso de la agricultura, esta sequía genera grandes restricciones que impiden un desarrollo, producción y cultivo adecuado en la zona, tales como un aumento de la demanda de agua para riego por unidad de superficie y menor disponibilidad de agua superficial y subterránea en áreas medias y bajas de las cuencas, además de verse afectada la infraestructura de captación de aguas superficiales afectada por cambios en morfología de los ríos.

La sequía genera mayores desafíos a las comunas que se encuentran al interior de la región más alejadas de la costa donde napas y pozos están cada vez más secos impidiendo obtener agua de fuente subterránea, interrumpiendo los sistemas de agua potable rural. Ha ocurrido en casi la totalidad de sus comunas siendo las más afectadas La Ligua, Petorca, Cabildo, Zapallar, Puchuncaví, La Calera, Quillota, Limache, Casablanca, Santo Domingo y Olmué

(Federación de juntas de vigilancia, 2023).

La gestión del agua a nivel territorial es uno de los grandes desafíos, por lo que, en el contexto de la Mesa Nacional del Agua se llevó a cabo la elaboración de los “Planes estratégicos de gestión hídrica” para implementar en las cuencas del país para el año 2030 (MOP, 2021).

Respecto a la proyección del balance hídrico a nivel nacional por región para el año 2030 presentada en la Tabla 1 basada en el crecimiento económico y de la infraestructura prevista a construir a la fecha, se espera que las comunas menos afectadas sean las del sur del país desde la región de O’Higgins hasta la región de Magallanes, las cuales presentan un balance positivo y capacidad de suplir la demanda esperada.

Por otro lado, las regiones más afectadas serán las ubicadas en la zona centro y norte del país, desde la región de Arica y Parinacota hasta la región Metropolitana, siendo la más perjudicada esta última debido a que concentra la mayor cantidad de habitantes y actividades productivas del País, seguida de la región de Valparaíso. Lo que indica que, en el caso de las regiones de esta zona de Chile, habrá más demanda que oferta de agua, lo cual se traduce en la incapacidad de poder abarcar la demanda hídrica proyectada aumentando el déficit hídrico y la sequía (Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile, 2015).

Tabla 1: Balance hídrico proyectado por región (Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile, 2015)

Región	Demanda (m ³ /s)	Oferta (m ³ /s)	Balance (m ³ /s)
Arica y Parinacota + Tarapacá	26,3	11,9	-17
Antofagasta	34,8	0,9	-33,8
Atacama	22,4	1,9	-20,5
Coquimbo	41,8	21,1	-20,7
Valparaíso	64,2	36,6	-38,7
Metropolitana	124,9	92,7	-51,4
O'Higgins	119,1	184,5	18,7
Maule	184,5	690,3	383,6
Biobío	246	1474,2	1033,3
Araucanía	38,3	936,9	675,4
Los Lagos + Los Ríos	17,9	4639,5	3508,1
Aysén	27	10134	8282,9
Magallanes	15,7	10124	8387,2
Total	962,9	28348,5	22107,1

Debido a lo presentado anteriormente, la búsqueda de nuevos métodos de obtención de agua es primordial. Uno de estos métodos no convencionales para obtener agua es la cosecha de agua atmosférica. Normalmente en zonas costeras la recolección de neblina es el método más utilizado, pero en zonas áridas y semiáridas se utilizan otras tecnologías que involucran compresión de vapor u otras tecnologías de refrigeración.

Este aprovechamiento de la humedad presente en la atmósfera es una de las soluciones más llamativas a la hora de mitigar el problema hídrico del país y poder destinar esta agua recolectada a la producción agrícola de bajo consumo de agua en zonas semiáridas del territorio nacional.

Sin embargo, se estima que la desalinización se convierta en la principal tecnología de producción de agua potable en el futuro, esto debido a que es capaz de producir grandes volúmenes de agua, pero así como pueden abastecer de grandes volúmenes, también requiere una gran cantidad de energía, además, la necesidad de una fuente de agua salada hace poco viable la implementación de estos sistemas en zonas alejadas de la costa y la

generación de subproductos como la salmuera dañando el territorio cercano a la planta deteriorando el ecosistema (Comité científico de cambio climático, 2022).

Se proyecta a futuro con relación a la disponibilidad de agua dulce que las nuevas tecnologías no convencionales para captación de agua obtendrán mayor relevancia para combatir la sequía. Por lo que, en ese contexto, el presente trabajo se enfoca en esta nueva fuente de generación de agua proveniente de la atmósfera.

2.OBJETIVOS

2.1.Objetivo general

- Realizar un análisis técnico y económico de la aplicación de una tecnología para la cosecha de agua atmosférica para destinarlo a la producción agrícola en una zona semiárida de la V región.

2.2.Objetivos específicos

- Seleccionar una localidad de la V región afectada por la sequía, en base a su déficit hídrico para mitigar la escasez de agua y aportar a la producción agrícola de la zona escogida.
- Desarrollar el marco teórico de las tecnologías de cosecha de agua atmosférica, seleccionando la más adecuada para la zona de estudio.
- Diseñar un sistema de cosecha de agua atmosférica capaz de suministrar agua de riego para la localidad seleccionada mediante una evaluación técnica.
- Realizar una evaluación económica del proyecto, mediante indicadores económicos para evaluar su factibilidad en el mercado.

2.3.Alcance

La presente evaluación se realizó a partir de la recopilación de antecedentes estadísticos, hidrológicos, geológicos e hidrogeológicos de las principales cuencas ubicadas en la Región de Valparaíso.

Cabe destacar que en este estudio no existió trabajo de terreno y los datos recopilados de temperatura y humedad relativa son los promedios tanto de sus valores mínimos y máximos, además de un promedio total de ambas variables. (MeteoBlue, 2022)

Las condiciones climáticas y geográficas se obtuvieron de la red climatológica Meteoblue, de aquí se descargó la base de datos de variables mencionadas anteriormente para las 3 comunas estudiadas (Petorca, La Ligua y Quillota) para un periodo comprendido entre el 24 de mayo de 2023 y el 6 de julio de 2023, periodo el cual era el máximo permitido para extraer información climatológica de la base de datos debido al gran volumen de datos y variables presentes, por lo que, en base a diagramas climáticos de Meteoblue, los cuales se

basan en 30 años de simulaciones de modelos meteorológicos para cada localidad, se complementó y se realizó una aproximación de las variables climáticas mensuales promedio entre estas dos fuentes de información histórica y proyectada.

El alcance de la evaluación abarcó desde la captación del aire para su uso en el sistema AWG hasta el almacenamiento del agua captada en la atmosfera en estanques, no contempló su posterior distribución, ni el estudio de suelo donde se suministrará este recurso, además de los códigos de agua y los marcos reguladores pertinentes

3.MARCO TEÓRICO

3.1.Análisis de sitio de estudio

La Región de Valparaíso, se encuentra ubicada en la zona céntrica del país, conectada con la capital, Santiago y con la macrozona central del país. Al norte limita con la región de Coquimbo, al sur con la Región de O'Higgins y al oeste con el Océano Pacífico. La capital regional es la ciudad de Valparaíso.

La V región está dividida en 8 provincias y 38 comunas. Se destaca por ser la región que cuenta con más provincias en el país, y por contar con una provincia que latitudinalmente se encuentra frente a la tercera región, como es el caso de Isla de Pascua (Gobierno Regional de Valparaíso, 2020).

Desde el punto de vista morfológico, la región de Valparaíso se caracteriza por ser una zona de transición, se pueden distinguir tres grandes valles transversales como el río Petorca, río La Ligua y río Aconcagua, además, esta región se localiza en un territorio orográfico complejo, donde las unidades morfológicas presentes son principalmente planicies litorales fluviales y marinas y un área montañosa interior (Consejo Regional Valparaíso, 2023).

En cuanto a la hidrografía de la región, presenta cuatro cursos principales, los cuales son: el río Petorca, río La Ligua, río Aconcagua y la desembocadura del río Maipo. Estos cursos de agua son de carácter nivo-pluvial, aunque en el caso de los ríos Petorca y La Ligua el aporte nival es escaso (Consejo Regional Valparaíso, 2023).

Respecto a la actividad agrícola de la región, la cual es la más relevante de esta zona, los cultivos frutícolas con mayor superficie sembrada son el palto, la vid de mesa y el nogal, sin embargo, comparando los datos de superficie de la región con los nacionales, los que presentan una mayor ocupación son el Palto, el duraznero y el limonero, lo que evidencia la importancia de esta actividad en la región abarcando el 13% de la superficie nacional, tal como se ve en la Tabla 2 realizada a partir del catastro frutícola para la región de Valparaíso (Ministerio de agricultura, 2020).

Tabla 2: Superficie V región y nacional por especie (Ministerio de agricultura, 2020)

Especie	Región (ha)	País (ha)	Región/País
Palto	20.317,8	32.387,2	63%
Vid de mesa	9.969,8	43.024,9	23%
Nogal	7.003,3	46.231,7	15%
Mandarino	2.321,4	11.183,6	21%
Limonero	2.021,5	8.080,8	25%
Duraznero tipo conservero	1.990,2	5.814,0	34%
Almendro	1.256,9	9.401,0	13%
Naranja	1.186,0	6.362,2	19%
Olivo	820,8	21.141,1	4%
Nectarino	295,4	6.623,7	4%
Otros	1.868,3	185.348,3	1%
Total	49.051,4	375.598,4	13,1%

Respecto a las otras especies de cultivos presentadas en las dos tablas a continuación (Tabla 3 y Tabla 4), donde se presenta el catastro de especies hortícolas y derivados del trigo respectivamente, si bien las primeras representan un porcentaje similar al de las especies frutícolas de ocupación nacional, se hace más énfasis en el análisis de las especies frutícolas ya que, individualmente presenta cultivos con más de la mitad de ocupación en la región, como es el caso de la palta, que para su crecimiento y desarrollo utilizan grandes volúmenes de agua, haciendo que la plantación y cultivo de esta especie sea uno de los principales responsables de la sequía agrícola en la zona.

En cuanto a los cultivos derivados del trigo, al no representar un gran porcentaje de ocupación a nivel regional, no se hace necesario analizar estos cultivos en la región debido a su poca incidencia en el uso de suelos y en la demanda del recurso hídrico que estas puedan generar.

Tabla 3: Superficie V región y nacional hortícola por especie. (ODEPA, 2022)

Especie	Región (ha)	País (ha)	Región/País
Lechuga	1.489,2	8.309,0	18%
Tomate consumo fresco	1.197,5	5.704,8	21%
Choclo	922,3	10.426,3	9%
Poroto granado	856,8	3.834,3	22%
Zanahoria	632,7	3.038,5	21%
Repollo	616,4	2.901,3	21%
Cebolla de guarda	359,7	5.228,8	7%
Ajo	320,1	1.776,3	18%
Cebolla temprana	271,6	3.378,9	8%
Coliflor	254,6	1.803,4	14%
Otros	2.570,3	38.092,0	7%
Total	9.491,1	84.493,7	11,2%

Tabla 4: Superficie V región y nacional de cultivos anuales por especie (ODEPA, 2022)

Especie	Región (ha)	País (ha)	Región/País
Trigo Harinero	515	193.613	0,3%
Papa	331	28.986	1,1%
Cebada Forrajera	232	3.140	7,4%
Maíz Consumo	126	41.794	0,3%
Poroto	88	5.396	1,6%
Trigo Candeal	58	23.120	0,3%
Otras	0	209.187	0,0%
Total	1.350	505.236	0,3%

3.1.1. Análisis de cuencas

Las cuencas son zonas geográficas definidas por la topografía del terreno, se caracterizan por ser una zona la cual lo delimitan líneas de crestas montañosas o divisorias de aguas, donde las aguas fluyen hacia una salida única. Estas zonas geográficas fundamentales para el ciclo del agua son responsables para su distribución y regulación. Las precipitaciones que ocurren dentro de una cuenca se recogen en forma de arroyos, riachuelos y ríos que fluyen hacia el punto más bajo de la cuenca, donde se encuentra la salida de agua.

La Región de Valparaíso presenta numerosos cursos de agua, debido principalmente a sus características geográficas, como se mencionó anteriormente, los principales cursos de agua en el sistema hidrográfico de la V Región son los ríos Petorca, La Ligua, Aconcagua.

Tanto la cuenca del río La Ligua como la cuenca río Petorca, ambas pertenecientes a la provincia de Petorca se ubican dentro de la macrozona centro, en el extremo norte de la V Región como se puede ver en la Figura 5 (Gobierno Regional de Valparaíso, 2020).

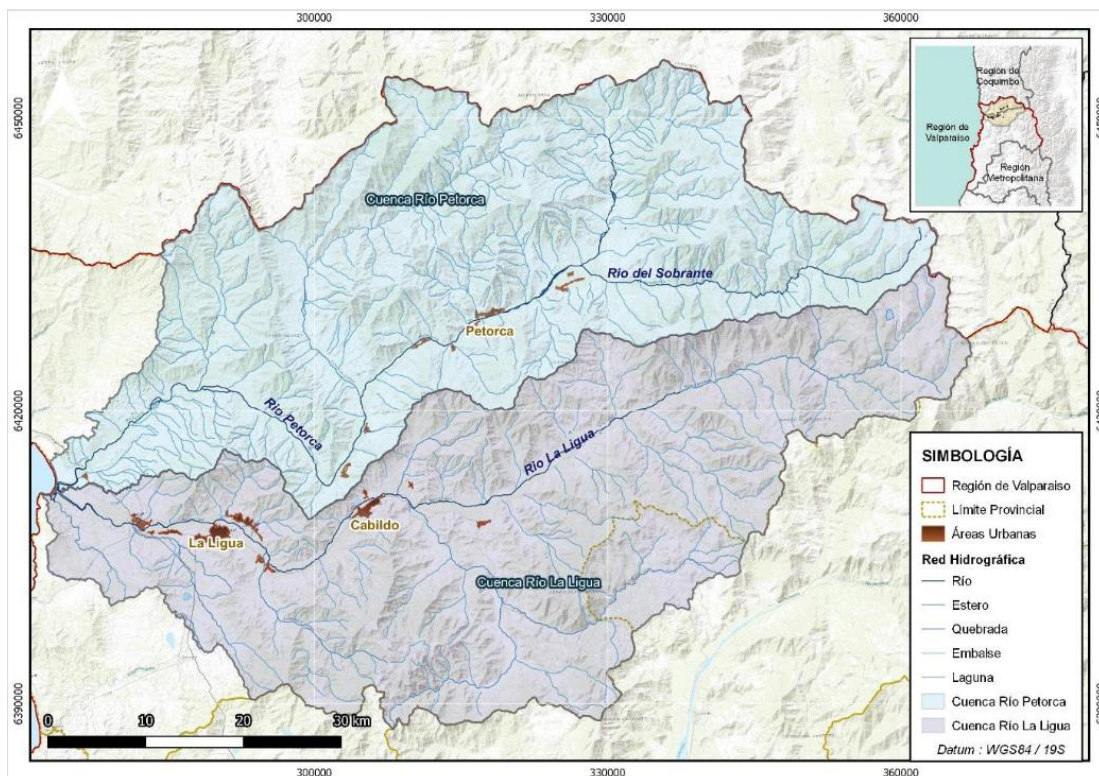


Figura 5: Mapa hidrográfico de la región de Valparaíso (Gobierno Regional Región de Valparaíso, 2022).

3.1.1.1. Cuenca río Petorca

La cuenca del río Petorca ocupa el extremo norte de la Región de Valparaíso, el río Petorca es el principal curso de agua de la cuenca, inicia en la cordillera de los Andes y desemboca en el Océano Pacífico. El río Petorca presenta una longitud de 120 km y una hoya hidrográfica de 1.986 km². Nace en la localidad de Chincolco y desemboca, tras recorrer 72 km, en el mar, al sur de la pequeña caleta Pichicuy (Ariel Muñoz, 2020).

La comuna seleccionada para el estudio y recolección de datos meteorológicos proyectados de esta cuenca fue Petorca, que presenta una altitud media aproximada de 506 msnm. Petorca presenta un clima seco con una temperatura media anual de 20 °C aproximadamente y la precipitación media anual es 500 mm aproximadamente, con una humedad relativa media del 71%. Los motivos de la elección de esta comuna en la cuenca estudiada (al igual que las comunas de las otras dos cuencas) son explicadas en la sección de metodología de trabajo del presente trabajo.

En la Figura 6 se presenta los datos de temperatura mínima y máxima mensual junto a la precipitación mensual, donde se puede apreciar que la máxima de precipitaciones es en el mes de junio y julio (MeteoBlue, 2022).

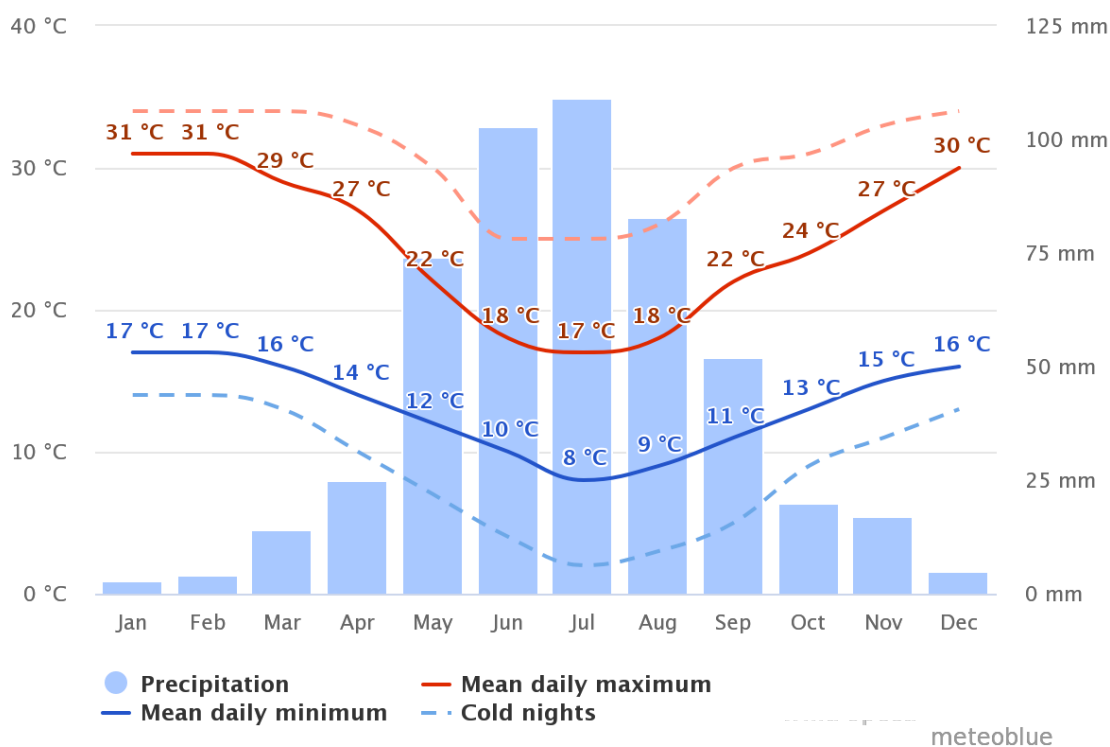


Figura 6: Variables meteorológicas mensuales proyectadas comuna de Petorca (MeteoBlue, 2022).

3.1.1.2. Cuenca río La Ligua

La cuenca del río La Ligua se inicia a 4.100 m.s.n.m. en el río Alicahue. Se denomina río La Ligua una vez que se junta con el Estero Los Ángeles, algunos kilómetros aguas arriba del pueblo de Cabildo.

Presenta una longitud de unos 110 km, una hoya hidrográfica de 2.100 km². Se forma cerca del pueblo de Cabildo, de la confluencia del río Alicahue y el estero cajón de Los Ángeles. Su caudal recorre 44 km hasta desembocar en la misma zona que el río Petorca (Arrau Ingeniería - Hídrica consultores, 2021).

La comuna seleccionada para el estudio y recolección de datos meteorológicos proyectados de esta cuenca fue La Ligua, comuna que presenta un clima semiárido con una temperatura media anual de 18 °C aproximadamente y precipitación media anual de 100 mm aproximadamente. No llueve alrededor de 320 días al año y presenta una humedad relativa media del 67%.

En la Figura 7 se presenta los datos de temperatura junto a la precipitación, donde se ve que más de la mitad del año las precipitaciones son menores a 5 mm (MeteoBlue, 2022).

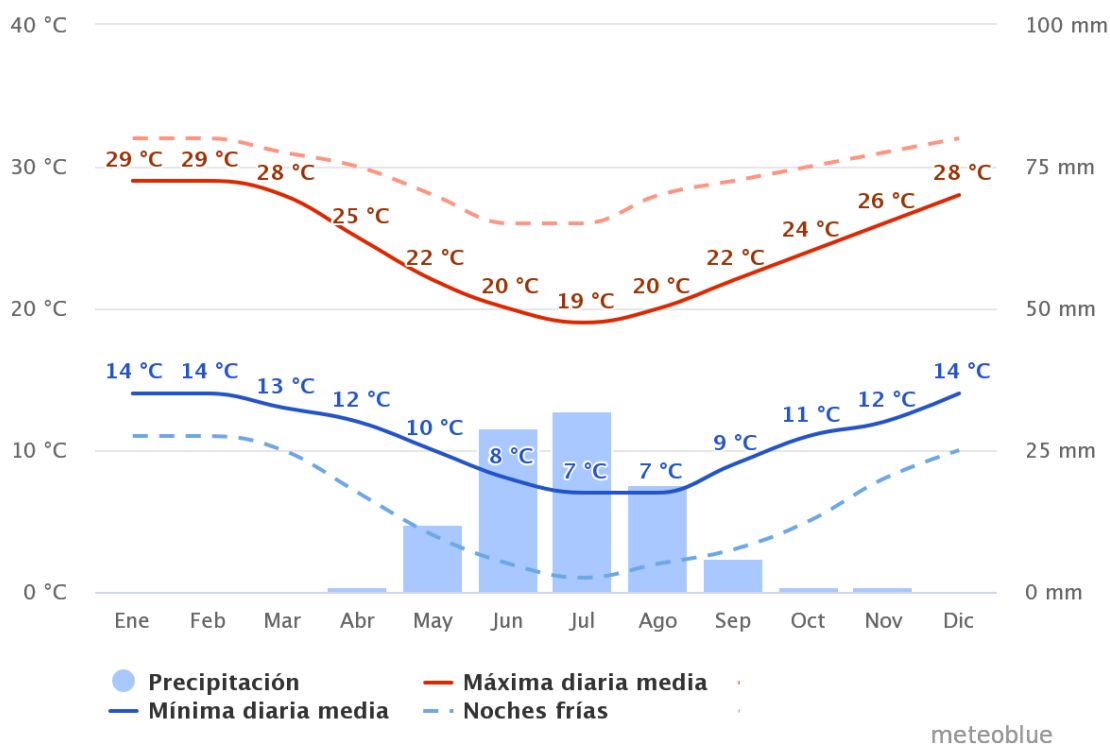


Figura 7: Variables meteorológicas mensuales proyectadas comuna de La Ligua (MeteoBlue, 2022).

3.1.1.3. Cuenca río Aconcagua

La cuenca río Aconcagua presenta una superficie de 7.200 km², El río Aconcagua atraviesa la región de este a oeste, tiene una longitud de 142 kilómetros proveniente de los ríos Juncal y Blanco. Es el último de los valles transversales del norte chico y se encuentra ubicado en el extremo sur de la región. (Center for climate and resilience research, 2023)

La comuna seleccionada para el estudio y recolección de datos meteorológicos proyectados de esta cuenca fue la comuna de Quillota ubicada en el centro de la Región de Valparaíso (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, 2021).

En la Figura 8, se presenta los datos de temperatura mínima y máxima mensual junto a la precipitación mensual, donde se puede apreciar que las precipitaciones son más que las de La Ligua, pero menores a la de Petorca, fenómeno que una de sus causas es la altitud a la cual se encuentran las comunas en estudio (MeteoBlue, 2022).

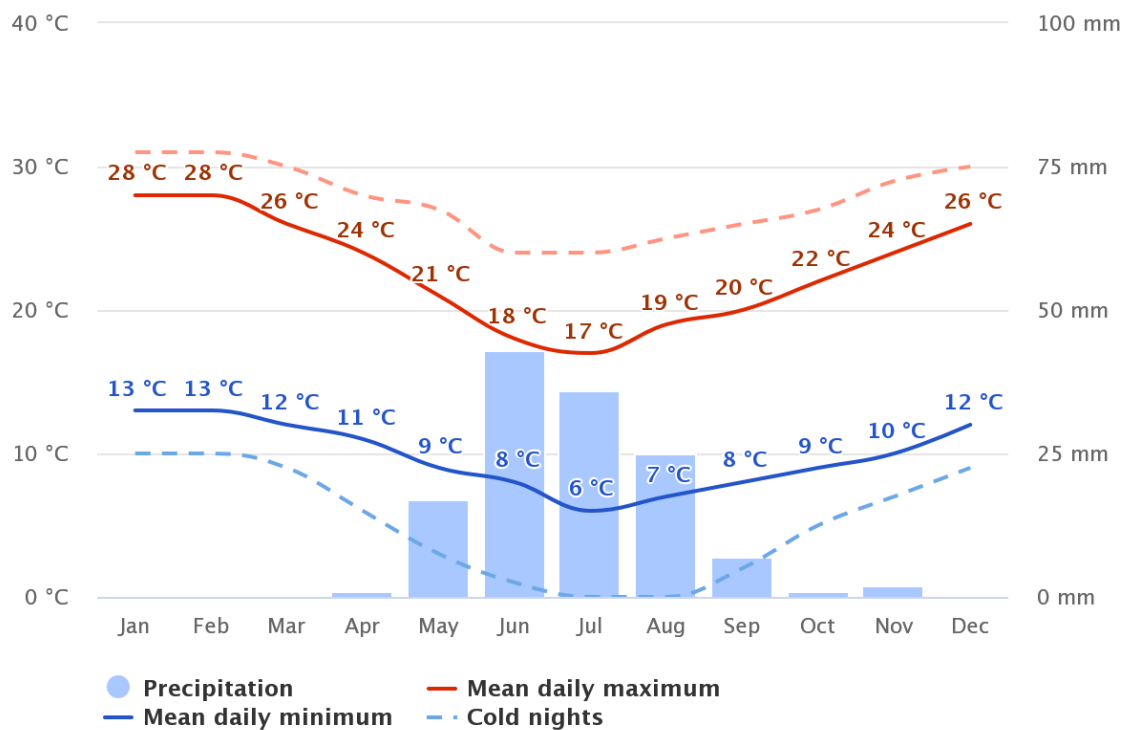


Figura 8: Variables meteorológicas mensuales proyectadas comuna de Quillota (MeteoBlue, 2022)

3.2. Análisis de tecnologías para recolección de agua

Respecto a las tecnologías de recolección de agua, existen distintos métodos los cuales son utilizados para la captación y almacenamiento de agua, tanto a pequeña como a gran escala dependiendo de las necesidades del lugar donde se quiera implementar.

3.2.1. Tecnologías de recolección de agua

3.2.1.1. Captación de agua de lluvia

Consiste en recolectar y almacenar el agua que cae durante las precipitaciones. Se utilizan techos o superficies impermeables para canalizar el agua hacia sistemas de recolección, como estanques de almacenamiento.

Esta tecnología es relativamente sencilla y ampliamente utilizada, especialmente en áreas donde las precipitaciones son frecuentes. En la Figura 9, se presenta un esquema de esta tecnología mediante recolección desde techos (CEPIS, 2004).

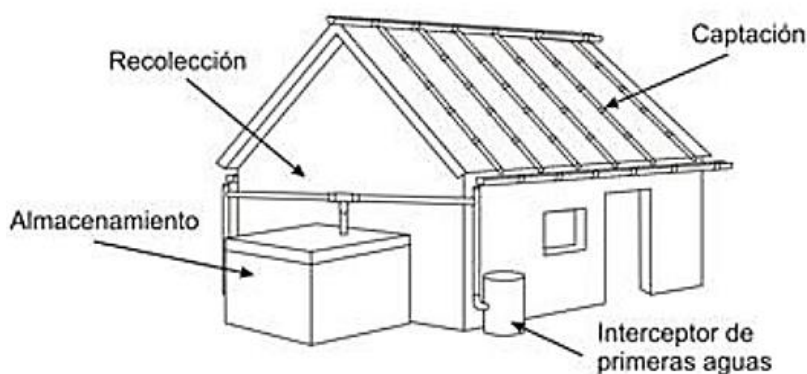


Figura 9: Esquema captación de agua de lluvia (CEPIS, 2004)

3.2.1.2. Captación de agua de fuentes subterráneas

Para la captación de esta fuente de agua se utiliza tecnologías como sistemas de extracción que permiten extraer agua de acuíferos y pozos profundos mediante bombas hidráulicas que impulsan el agua de las napas hacia la superficie. (Reckmann, 2023)

En la Figura 10 se puede ver una secuencia del funcionamiento de esta tecnología de recolección de agua.

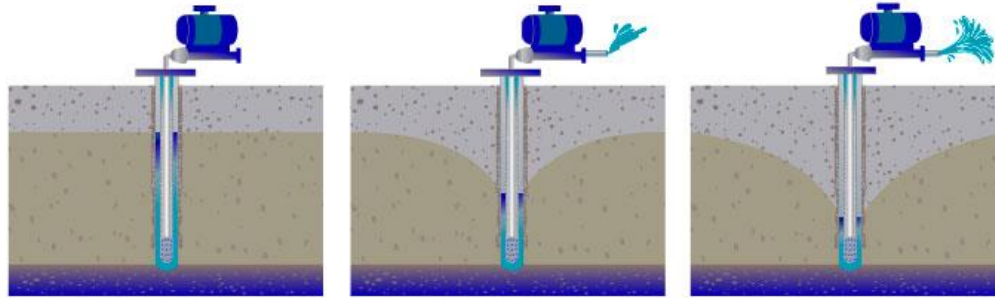


Figura 10: Esquema captación aguas subterránea (Pozos profundos S.A., 2023)

3.2.1.3.Desalinización

La desalinización es el proceso de eliminación de la sal y otras impurezas del agua de mar para obtener agua dulce utilizable. Se emplean tecnologías como la ósmosis inversa y la destilación para desalinizar el agua, es especialmente relevante en regiones costeras con escasez de agua dulce.

El mecanismo de desalinización más utilizado en la industria para la recolección de agua es la osmosis inversa, proceso el cual se aplica presión al agua de mar para pasar por una membrana semipermeable, que permite el paso del agua, pero no del soluto, obteniendo así agua libre de las sales minerales disueltas en el agua de mar. En la Figura 11 se presenta un esquema de esta tecnología. (Ecología verde, 2020)

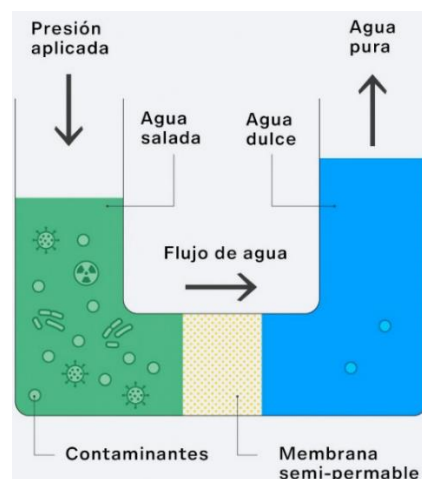


Figura 11: Esquema desalinización RO (Ecología verde, 2020)

3.2.1.4. Reutilización de aguas residuales

Este método implica tratar y purificar las aguas previamente utilizadas para convertirlas en agua apta para usos no potables, como riego de jardines, lavado de autos o sistemas de refrigeración. Las aguas residuales se dividen en aguas grises correspondientes a las provenientes de agua de ducha, lavamanos y lavaderos y aguas negras provenientes del inodoro. En la Figura 12 se muestra un esquema del proceso de este método de obtención de agua. (María Verdeguer Pérez, 2018)



Figura 12: Esquema de método de recolección de aguas residuales (María Verdeguer Pérez, 2018)

Si bien, las tecnologías de obtención de agua presentadas anteriormente son ampliamente utilizadas a nivel mundial son consideradas los métodos más convencionales para su obtención. Hoy en día, debido a la sequía que está presente en el planeta la cual va en aumento, es que se busca métodos no convencionales de obtención de agua que no dependan de las precipitaciones ni de la reserva de fuentes subterráneas de agua ya que cada vez hay menor disponibilidad de estas por los efectos adversos que trae consigo la crisis hídrica.

Es por esto que se está profundizando y ampliando el estudio de fuentes de obtención de agua nuevas para no agotar los recursos de agua existentes.

3.2.2. Cosecha de agua atmosférica

La cosecha de agua atmosférica (AWG por sus siglas en inglés) es una tecnología que permite recolectar el agua presente en el aire, ya sea en forma de vapor o en partículas líquidas como el rocío. Este proceso no afecta negativamente al medio ambiente y no consume ningún tipo de recurso hídrico convencional ya que la humedad utilizada para la obtención de agua se repondrá naturalmente mediante el ciclo hidrológico, además, pueden suministrar agua en caso de contaminación de las fuentes de agua existentes y resolver el problema de la escasez de agua, especialmente en localidades remotas, de baja precipitación y áridas, como es el caso de las localidades en estudio (Portal Innova, 2023).

Las reservas mundiales de agua y sus correspondientes restricciones de adquisición y utilización ubican al vapor de agua de la atmósfera como una gran alternativa para transformarse en un recurso de agua, ya que no sólo la atmósfera contiene una gran cantidad de esta, sino que además este vapor de agua puede adquirirse sin restricciones de condiciones geográficas o hidrológicas, lo que favorece su acceso incluso sin la necesidad de pasos adicionales para su purificación (Xiaoyi Liu, 2022)

Los métodos de recolección de agua atmosférica se pueden dividir en 3 tecnologías principalmente, las cuales se presentan en la Figura 13 (Raveesh G, 2023).

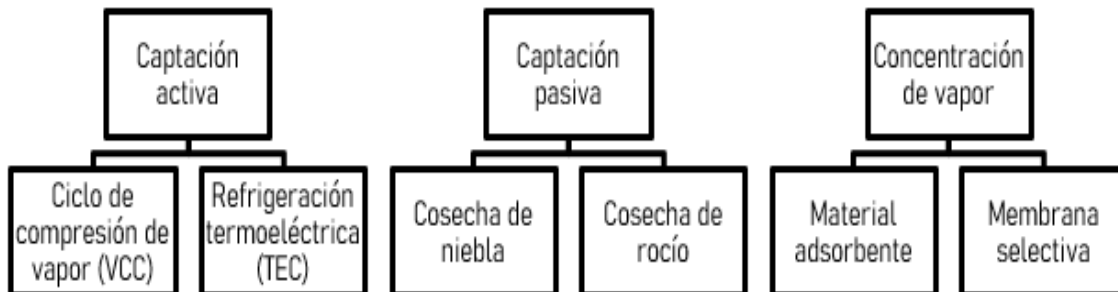


Figura 13: Tecnologías de recolección de agua atmosférica (Raveesh G, 2023)

3.2.2.1. Captación activa

Tecnología basada en el enfriamiento del aire por debajo de su temperatura de rocío mediante un ciclo de potencia para que se genere la condensación del aire y así poder recolectar agua. El rendimiento de esta tecnología se evalúa respecto a la recolección de agua que corresponde a la masa de agua recogida por hora.

Esta refrigeración facilita la condensación forzada y controlada del vapor de agua presente en el aire que ingresa al proceso, pero a expensas de energía de alto grado como la electricidad. (Raveesh G, 2023)

El enfriamiento requerido por debajo de la temperatura del punto de rocío del aire generalmente se logra utilizando técnicas de refrigeración convencionales de compresión de vapor o refrigeración termoeléctrica.

Esta tecnología es más factible para condiciones de alta humedad relativa y temperatura, sin embargo, su rango de operación es bastante amplio y se puede utilizar en la mayoría de las condiciones climáticas. (Raveesh G, 2023)

Estos sistemas, si bien, se adecuan a la mayoría de los ambientes siendo los más efectivos, consumen mucha energía, por lo que la utilización de fuentes de energía renovables como la energía solar fotovoltaica es una opción más sostenible al momento de su evaluación.

A pesar de tener una amplia operación y ser posible su uso en la mayoría de los ambientes, hay características climáticas que favorecen la producción de agua. Mientras mayor sea la temperatura de bulbo seco y humedad relativa, mayor será la cantidad de agua contenida en el aire favoreciendo la captación de agua, además de ser inversamente proporcional con el flujo de aire requerido, es decir, a mayor temperatura y humedad relativa mayor tasa de captación de agua y menor volumen de aire será necesario que ingrese al proceso, tal como se muestra en la Figura 14 de acuerdo con distintas pruebas experimentales. (Barry L. Spletzer, 2001)

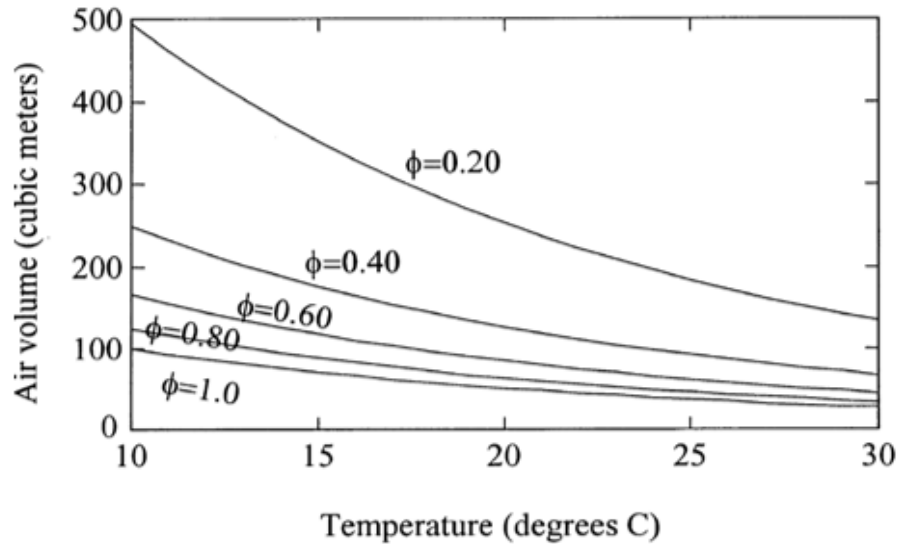


Figura 14: Relación Temperatura y HR con volumen de aire necesario para tecnología VCC (Barry L. Spletzer, 2001)

El mecanismo de funcionamiento se basa en la deshumidificación del aire que ingresa al sistema, el cual se presenta de manera esquemática en la Figura 15, donde el punto 1 es el aire del ambiente que ingresa al ciclo de compresión, el punto 2 corresponde al aire enfriado en el evaporador, el cual presenta una humedad relativa de 100% llegando a la saturación. El punto 3 corresponde al flujo de aire que sale del evaporador luego de retirado el condensado del punto 2, por esta razón presenta menor humedad absoluta que el punto 2. La diferencia de humedad absoluta entre el punto 2 y 3 corresponde a la cantidad condensada de vapor de agua.

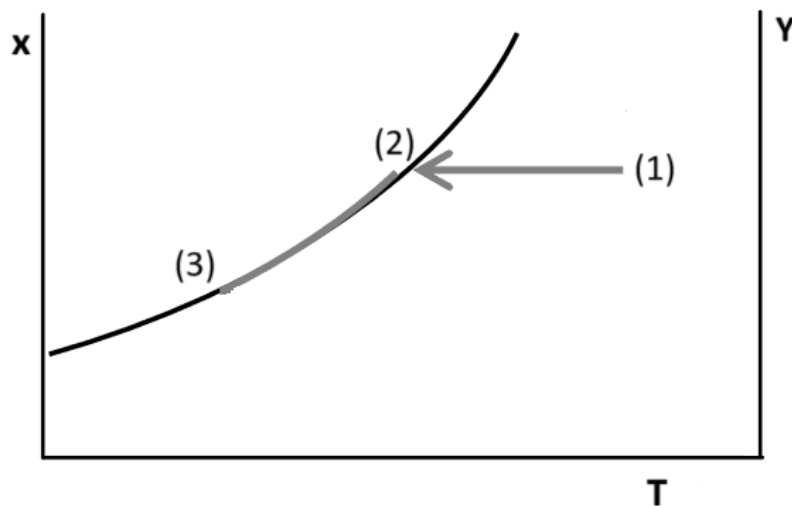


Figura 15: Proceso de deshumidificación del aire en carta psicrométrica

Se presenta el diagrama de bloques del proceso de deshumidificación del aire que ingresa a la tecnología de refrigeración activa en la Figura 16, donde se ve que el agua condensada que sale del sistema presenta la misma temperatura que el aire que sale al ambiente luego de retirarle parte del vapor de agua contenido en él.

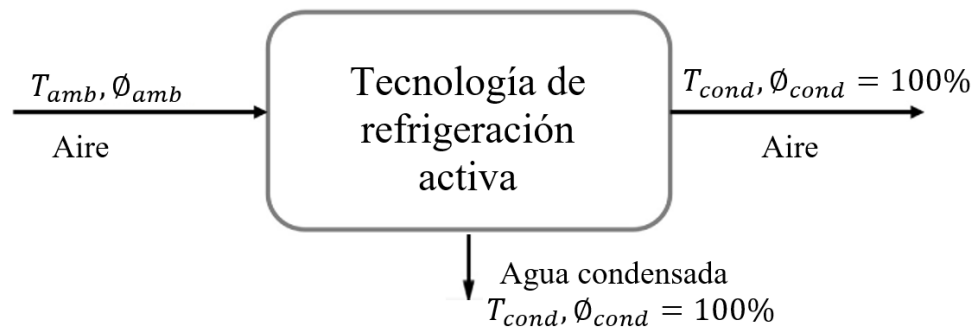


Figura 16: Diagrama de bloque del proceso de ciclo de compresión, Refrigeración activa (Farshid Bagheri, 2018)

• Ciclo de compresión de vapor (VCC)

El proceso de obtención de agua mediante condensación de vapor de agua atmosférica presenta el mismo mecanismo de operación que los refrigeradores y aires acondicionados, se lleva a cabo en un ciclo de compresión simple, donde el aire húmedo ingresa a la sección del evaporador del sistema con la ayuda de un ventilador, para luego enfriar el aire por debajo de su temperatura de punto de rocío y condensando el vapor sobre el serpentín del evaporador recolectando el agua condensada en un tanque de almacenamiento.

Los principales factores que depende esta tecnología son la capacidad de enfriamiento del sistema, la cantidad de aire que ingresa y las propiedades psicrométricas del aire de entrada. Los sistemas basados en compresión de vapor deben enfriar grandes volúmenes de aire si la humedad relativa del ambiente donde se requiere el agua es baja. Además, para su funcionamiento se requiere una gran cantidad de energía eléctrica para mantener la temperatura requerida para la condensación del vapor de agua por debajo del punto de rocío, por lo que gran parte del costo total del proyecto está asociado al consumo de energía de la tecnología, lo que compensa las grandes cantidades de recolección de agua en comparación a las otras tecnologías. (Raveesh G, 2023)

A ciertos niveles de humedad relativa y temperatura se observa un decaimiento del

rendimiento de esta tecnología debido a la temperatura de operación del evaporador, por ejemplo, a niveles de humedad relativa bajo 30% con una temperatura de bulbo seco alrededor de 18 °C, el punto de rocío estará cercano a 0 °C, haciendo que su funcionamiento en tales condiciones climáticas se vea reducido ya que dentro del evaporador, existe la posibilidad que se forme escarcha sobre el serpentín del equipo, generando una resistencia a la transferencia de calor provocando problemas y la detención del equipo. Por lo que la temperatura óptima de operación del evaporador debe ser superior a los 4 °C para evitar su congelamiento y mal funcionamiento y poder garantizar una operación continua. (Ben Gido, 2016)

La ventaja de esta tecnología es la incorporación de distintos complementos o variaciones para su optimización y así aumentar su rendimiento, existe la posibilidad de enfriar el aire de entrada con el aire frío de salida del evaporador, o la incorporación de una unidad de preenfriamiento del aire antes de ingresar al evaporador para mejorar sus propiedades psicrométricas, haciendo que esta tecnología tenga una muy buena proyección a futuro siendo una de las más estudiadas.

A continuación, en la Figura 17, se presenta un esquema de los elementos que componen esta tecnología.

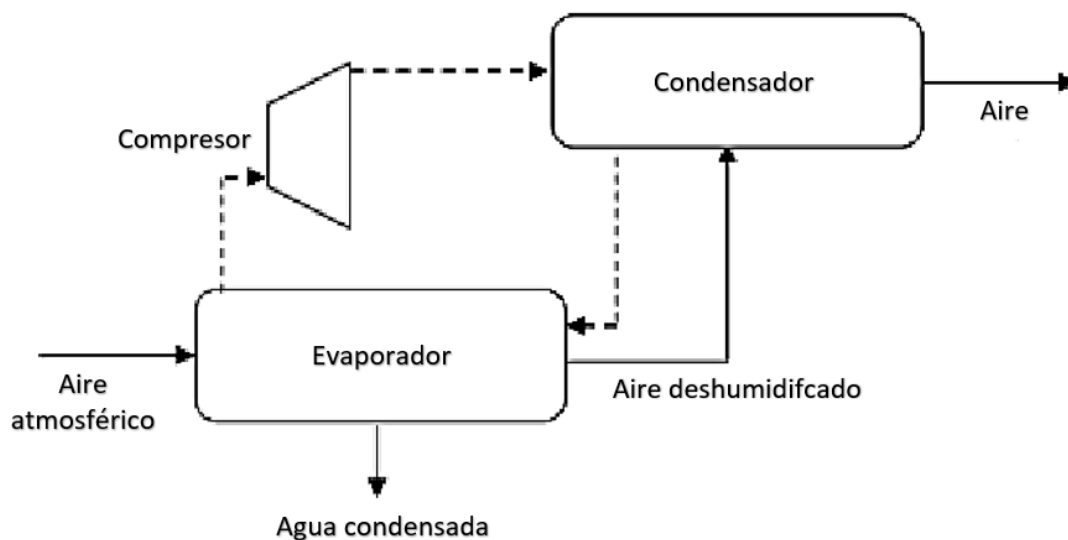


Figura 17: Deshumidificación de aire mediante refrigeración activa por método de compresión de vapor (Abhishek Dash, 2022)

• Refrigeración termoeléctrica (TEC)

Otro enfoque basado en la refrigeración activa es la refrigeración termoeléctrica (TEC), que utiliza el efecto de Peltier para su funcionamiento, donde en los módulos del TEC se crea un gradiente de temperatura entre las dos caras, aplicando una diferencia de potencial eléctrico, provocando así la condensación en la superficie más fría la cual está por debajo de la temperatura de punto de rocío. Para disipar de forma óptima el calor de la cara caliente del módulo y protegerlo del sobrecalentamiento, los módulos TEC suelen ir acompañados de un conjunto de disipadores de calor. (Dia Milani, 2011)

Estos módulos presentan las ventajas de ser compactos, silenciosos y ligeros, no tener piezas móviles y no utilizar ningún material refrigerante a diferencia de la refrigeración por compresión de vapor, otra diferencia respecto al método de compresión, es que el método de refrigeración termoeléctrica presenta una menor eficiencia por lo que el almacenamiento de agua es mucho menor, este rendimiento es función de la temperatura ambiente, la eficiencia de los intercambiadores de calor de las partes fría y caliente, la carga térmica, la geometría del módulo Peltier y sus parámetros eléctricos. (Casallas, 2021)

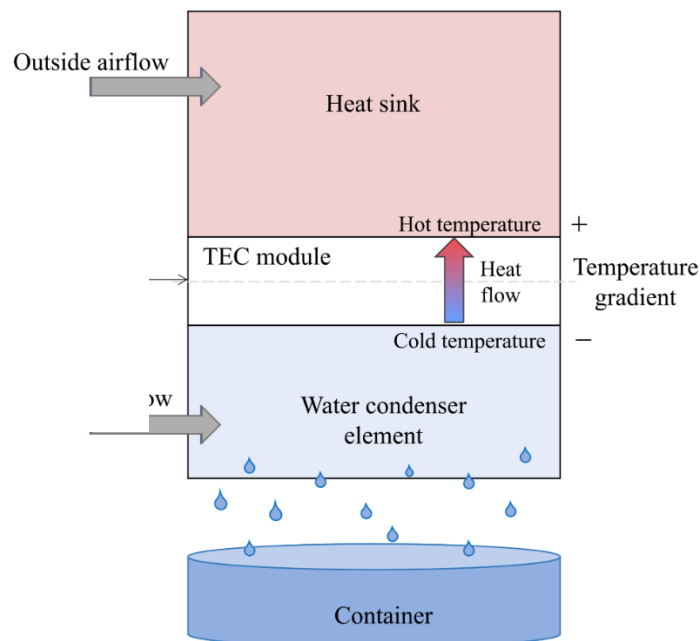


Figura 18: Diagrama de refrigeración termoeléctrica (Casallas, 2021)

3.2.2.2. Captación pasiva

Esta tecnología no requiere fuente de energía externa para condensar el agua de la atmosfera por lo que puede ser implementada en lugares sin acceso a instalaciones eléctricas, utilizada en lugares con alta cantidad de nieblas y donde se forme rocío. Es una opción económica debido a su facilidad en su funcionamiento y la poca cantidad de equipos necesarios, sin embargo, la generación de captación de agua atmosférica, al depender completamente de las condiciones climáticas y ser sensibles a ellas, es lenta, debido a esto normalmente se cuantifica la captación en unidades de litros por día en este tipo de tecnologías.

Existen dos métodos dentro de la captación pasiva, la cosecha de niebla y la cosecha de rocío.

- **Cosecha de niebla**

La recolección de niebla se hace mediante estructuras en forma de malla, permitiendo el crecimiento de las gotas por coalescencia y para su posterior atrapamiento mecánico por gravedad. El rendimiento depende de la superficie cubierta y de las condiciones climáticas del lugar.

se basa en que las pequeñas gotas de agua presentes en la niebla precipitan al entrar en contacto con los objetos pudiendo recolectar así el agua, presenta una producción entre 1,5 y 12 L/m² por día en los países donde hay niebla todo el año y presentan humedad relativa elevada. (Fressehaye, 2014)

Para maximizar el rendimiento de este método se necesita una elevada humedad relativa en el sector superior al 90%, una elevada altitud de la zona (alrededor de 600 msnm) y una velocidad del viento considerable de unos 20 a 40 km/h. por lo que, en lugares que no cumplan estas específicas condiciones meteorológicas y geográficas el rendimiento de este método decaerá bastante siendo poco viable para climas más áridos. (Ayman F. Batisha, 2014)

A continuación, en la Figura 19, se ve la instalación de un sistema de mallas atrapa nieblas.

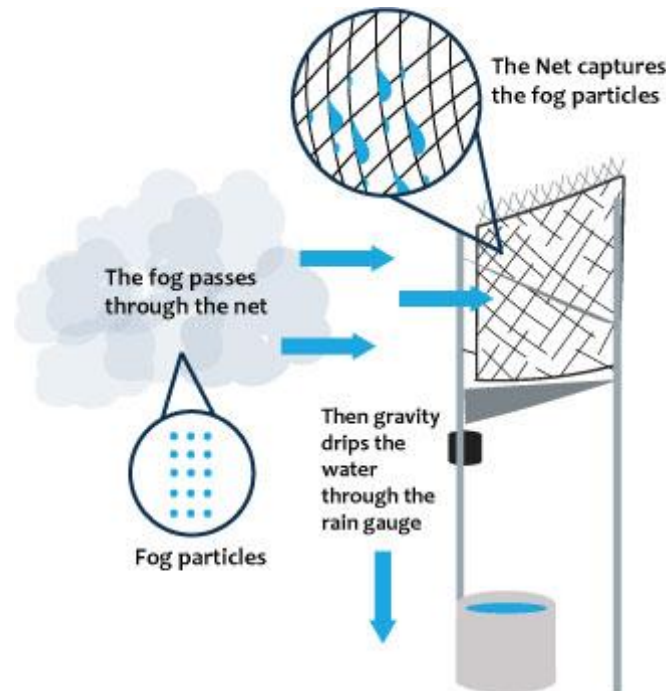


Figura 19: Esquema de cosecha de agua atmosférica con atrapanieblas (bay side fog collectors, 2023)

• Cosecha de rocío

Este método de recolección de agua depende en gran medida de la geometría y el material del colector o del condensador pasivo, la producción de rocío es menor a 0,8 L/m² por día. En esta tecnología la temperatura del punto de rocío necesaria para iniciar la condensación del vapor de agua se alcanza en un sustrato mediante enfriamiento radiativo pasivo, disipando el calor del sustrato al exterior. (Peeters, 2020)

Su modo de funcionamiento se base en la instalación de colectores de baja absorción solar en lugares abiertos, donde emite su calor hacia el exterior alcanzando una temperatura por debajo a la temperatura de rocío para lograr condensar el agua. Los materiales más comunes para la fabricación de colectores de recolección de rocío son el nitruro de silicio, dióxido de silicio, aluminio, entre otros.

En la figura 20 presentada a continuación, se aprecia un esquema del funcionamiento de esta tecnología.

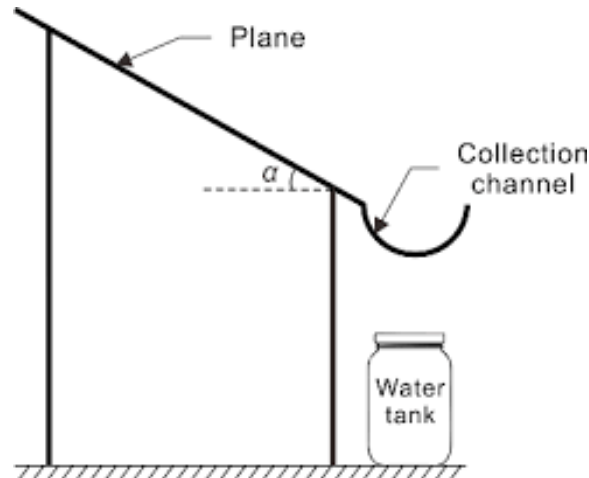


Figura 20: Esquema de cosecha de rocío (R Ziatdinov, 2019)

3.2.2.3. Concentración de vapor

• Sorción

Un material adsorbente sólido capta el vapor de agua de la atmósfera hasta su saturación, es capaz de trabajar a muy bajo porcentaje de humedad relativa. La tasa de recolección de agua depende del material adsorbente utilizado además de las condiciones climáticas de entrada. (Entezari, 2019)

El mecanismo de funcionamiento se basa en un material adsorbente sólido que capta el agua de la atmósfera. Una vez que el material se satura, el agua se recupera mediante un ciclo de regeneración que implica adición de calor al material aumentando el contenido de humedad del aire. (M Ejeian, 2021)

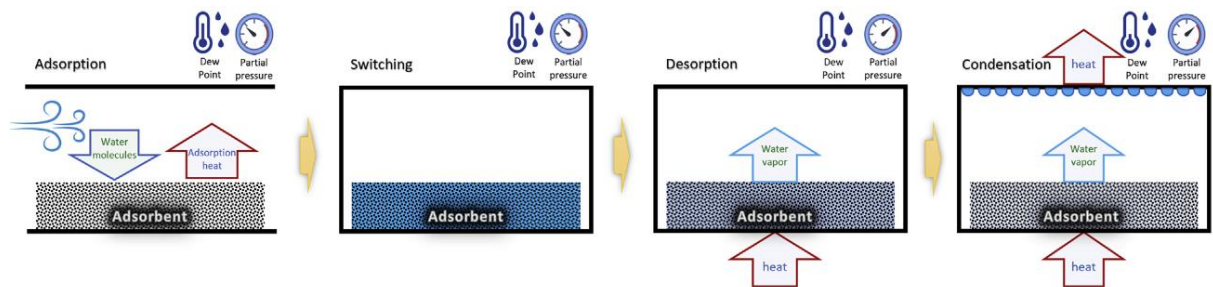


Figura 21: Mecanismo de funcionamiento basado en método de sorción (M Ejeian, 2021)

• Membrana selectiva

Utiliza un sistema de vacío para generar un diferencial de presión entre 2 caras de la membrana haciendo que el vapor de agua pase para un lado de la membrana separándolo de los otros gases no condensables presentes en el aire de la atmosfera. (Bergmair D. , 2014)

Permite permeabilizar las moléculas de vapor de agua, así como otros gases no condensables. La membrana selectiva reduce el consumo de energía en más de un 50% y duplica la cantidad de agua condensada en comparación con el sistema sin membrana selectiva. Sin embargo, estos sistemas tienen un bajo rendimiento con humedades relativas bajas lo que hace que no sean adecuados en climas secos (Bergmair, 2014)

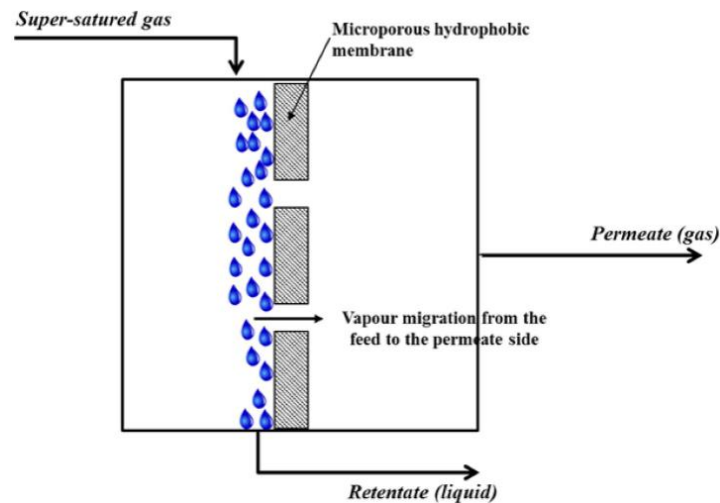


Figura 22: Esquema de funcionamiento membrana condensadora (Macedonio F, 2017)

3.2.2.4. Comparación de tecnologías AWG

Se presenta en la Tabla 5 una comparación de las distintas tecnologías explicadas anteriormente, donde se mencionan sus ventajas, desventajas y capacidad de producción de agua.

Tabla 5: Comparación de las distintas tecnologías de captación de agua atmosférica

Tecnología	Método	Ventajas	Desventajas	Capacidad de producción
Captación activa	VCC	Alto WHR, gran rango de operación, estructura compacta.	WHR disminuye cuando el aire está seco, requiere energía externa.	1-20 L/día. >1000 L/día.
	TEC	Estructura compacta.	Baja WHR y alto UPC comparado con VCC.	1-5 L/día.
Captación pasiva	Cosecha de niebla	No requiere energía, poco mantenimiento.	Bajo WHR.	< 12 L/m ² /día.
	Cosecha de rocío			< 0,8 L/m ² /día.
Concentración de vapor	Sorción	Variabilidad entre adsorbentes, gran potencial de pruebas experimentales.	Bajo WHR, recolección de agua no continuo.	1-2,8 L/m ² /ciclo.
	Membranas	Favorable para clima seco, capacidad de adaptarlo a otra tecnología AWG.	Bajo WHR por si sola.	0,2-0,4 L/día.

WHR= Water harvesting rate, UPC= Unit power consumption

3.2.2.5. Proyección tecnologías AWG

El tamaño del mercado mundial de tecnologías de generación de agua atmosférica se situó en 2.9 MUSD (Millones de dólares) el año 2022 y se proyecta un aumento hasta 5.52 MUSD el año 2032, lo que se traduce en un aumento con una tasa de crecimiento del 6% entre este periodo de tiempo.

Esto debido a los factores mencionados a lo largo de este estudio como la creciente contaminación del agua y el aumento de la escasez de agua potable, que impulsarán el crecimiento de este mercado para revertir esta situación. (Precedence research, 2023)

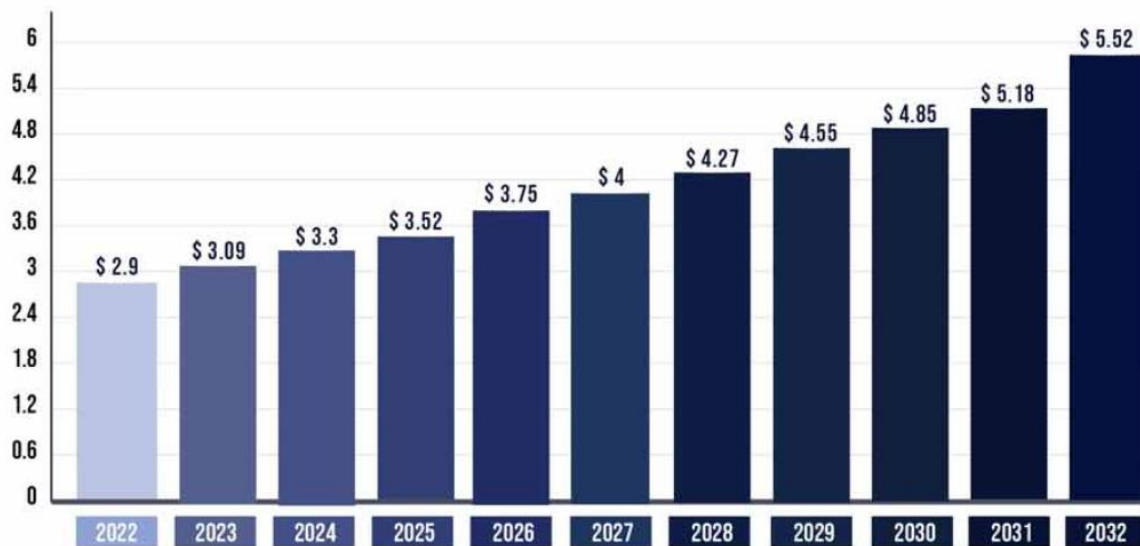


Figura 23: Proyección mercado de AWG hasta 2032 (MUSD) (Precedence research, 2023)

Según la distribución por zona de ingresos asociados a las tecnologías AWG presentado en la Figura 24, Asia-Pacífico es la zona que más abarca con el 36% de los ingresos mundiales del mercado. Esto se explica debido a la fuerte influencia de importantes inversiones realizadas en países como China e India para desarrollar esta tecnología.

Se estima que América del Norte, Subcontinente el cual al año 2022 tiene el 30% de los ingresos del mercado de AWG crezca a un ritmo del 8,5% hasta el 2032 principalmente debido la rápida industrialización y la presencia de grandes empresas impulsan este mercado.

Por otro lado, en zonas menos desarrolladas o en vías de desarrollo como América Latina o África, donde la escasez del agua es más crítica, varios gobiernos ya han tomado la

iniciativa poniendo en marcha planes estratégicos a largo plazo para revertir la sequía y fomentar tecnologías no convencionales de obtención de agua. (Precedence research, 2023)

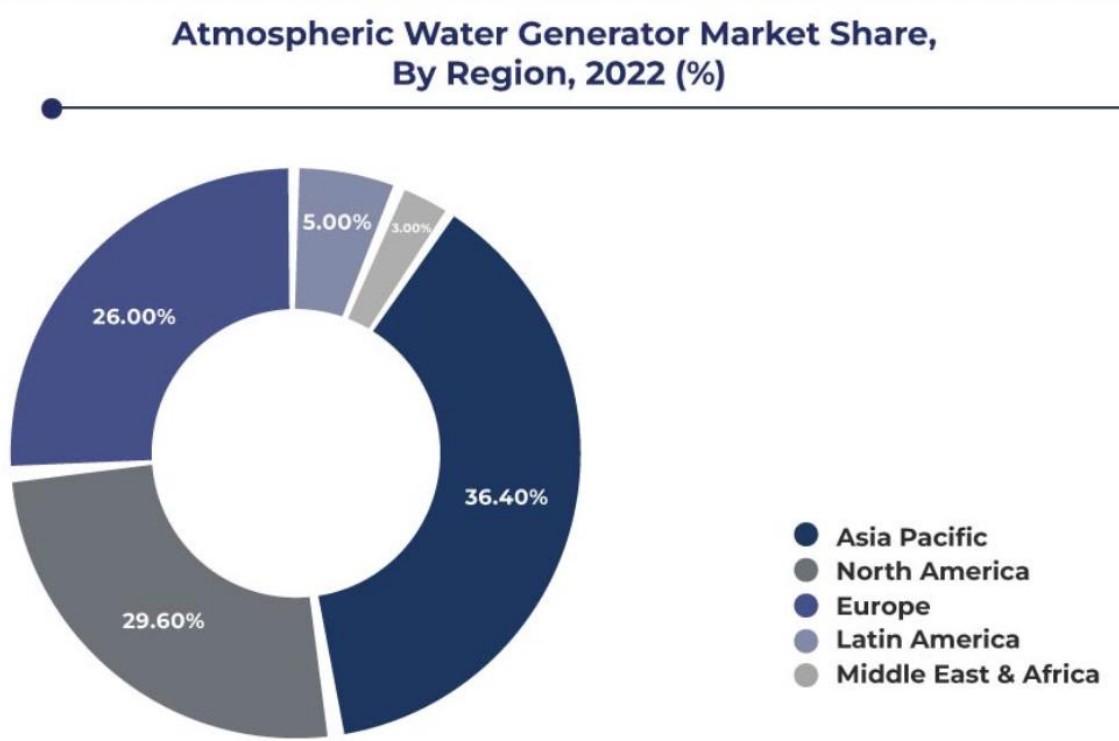


Figura 24: Distribución continental del mercado de tecnologías AWG (Precedence research, 2023)

4.METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para llevar a cabo el proyecto, el primer paso de la metodología de trabajo fue la elección de la zona de estudio entre las 3 comunas de la V región en estudio. La justificación de la elección de estas 3 comunas se basa en el análisis de comunas afectadas asociadas a las tres cuencas principales de la región (Cuenca río La Ligua, cuenca río Petorca y cuenca río Aconcagua), por lo que se seleccionó una comuna por cada cuenca, siendo estas las que presentan mayores problemas asociados a la sequía y/o mayor incidencia en la actividad productiva agrícola.

Además, se recopilaron las variables asociadas a la actividad agrícola a nivel regional como la superficie por categoría de tipo de cultivo agrícola, el rendimiento de los cultivos y el requerimiento hídrico para garantizar un correcto cultivo de las especies.

Una vez obtenido los datos mencionados anteriormente se procedió a la elección del sitio basado principalmente en los cultivos de cada zona, ya que, considerando la creciente crisis hídrica y el enfoque de la memoria, se buscó suministrar agua para uso agrícola de cultivos que presenten un bajo consumo de agua, por lo que esto fue la variable más importante a la hora de elegir la localidad ya que, en cuanto a sus variables meteorológicas y características geográficas no difieren lo suficiente para poder tomar una decisión solo con esos datos.

La demanda agrícola que se abarcó mediante el suministro de agua con el desarrollo de una tecnología de captación de agua atmosférica se basó principalmente en el porcentaje de demanda del cultivo seleccionado dentro de la comuna y su rendimiento hídrico que indica si es de bajo consumo o no.

En cuanto a la elección de las tecnologías presentadas en el marco teórico, esta se basó principalmente en el rendimiento que ofrecen, es decir, en cuanto flujo de agua es capaz de suministrar, el cual debe ser capaz de suplir la demanda de agua, además de la adaptabilidad a las condiciones climáticas de la zona y la potencia que consume cada tecnología.

Una vez que se seleccionó los principales factores del proyecto en base a los criterios mencionados anteriormente, se realizó una evaluación técnica en base a la tecnología seleccionada para determinar los principales parámetros asociados al rendimiento y consumo del proceso de cosecha de agua atmosférica, además de una evaluación económica donde se estimó el costo de inversión (CAPEX) y costo de operación (OPEX),

además del cálculo de indicadores económicos como el VAN, el TIR, y el Payback, para analizar la prefactibilidad del proyecto y en cuanto tiempo se recuperaría a inversión inicial en caso de ser rentable.

A continuación, se presenta el resumen de la metodología de trabajo descrita anteriormente:

a) Elección de localidad.

- Variables meteorológicas.
- Actividad agrícola.

b) Elección de cultivo.

- Requerimiento hídrico.
- Superficie cultivada.

c) Elección de tecnología de cosecha de agua atmosférica.

- Condiciones de operación.
- Rendimiento.
- Consumo eléctrico.

d) Viabilidad del proyecto.

- Evaluación técnica.
- Evaluación económica.

5. ESTUDIO TÉCNICO

5.1. Selección de variables

5.1.1. Selección de localidad y cultivo agrícola

Se recopiló, analizó y comparó los principales datos meteorológicos como la temperatura mínima, máxima y media, la altitud de la localidad, la precipitación acumulada del año y la humedad relativa promedio al año, para las 3 localidades presentadas en el marco teórico.

Cabe destacar que los datos presentados en la Tabla 5 corresponden a estimaciones basadas en datos proyectados e históricos mensuales promedios, por lo que se debe tener en consideración el error asociado a estos datos debido a la variabilidad de la temperatura y humedad relativa a lo largo de las estaciones del año.

Tabla 6: Datos meteorológicos de comunas analizadas de la región de Valparaíso (MeteoBlue, 2022)

Cuenca	Comuna	T media	Altitud	Precipitación	HR media
Río Petorca	Petorca	19 °C	506 msnm	509 mm	71 %
Río La Ligua	La Ligua	18 °C	78 msnm	101 mm	67 %
Río Aconcagua	Quillota	16°C	128 msnm	132 mm	69 %

En base a la distribución de los cultivos frutícolas presentadas en las comunas de Petorca, La Ligua y Quillota, según el último catastro por comuna realizado en la región de Valparaíso presentada en la Tabla 7 para las comunas estudiadas, se observa que las especies frutícolas con mayor superficie sembrada y mayor producción en general en las tres zonas de estudio son palto, limonero, naranjo y olivo. Sin embargo, debido al sobre cultivo de estas especies es que actualmente se vive esta sequía en la zona, por lo que se está buscando y priorizando el cultivo de especies que generen un menor consumo de agua para lograr mitigar la situación que se vive.

Tabla 7: Distribución de superficies de cultivo en las comunas en estudio

Especie	Superficie (Ha)		
	Petorca	La Ligua	Quillota
Palto	763,86	1.295,26	1.866,52
Limonero	179,18	277,67	357,45
Naranja	18,76	19,04	252,55
Nogal	376,55	1,66	90,16
Arándano	6,51	-	64,09
Mandarino	196,99	41,39	43,85
Cerezo	9,2	-	34,76
Olivo	16,31	72,11	17,47
Níspero	-	4,46	6,89
Lúcumo	-	20,61	1,34
Lima	-	2,47	0,84
Almendro	29,95	56,45	0,35
Granado	-	1,4	0,03
Tuna	4,08	12,84	0,01

En la Tabla 8 se muestra el requerimiento hídrico por hectárea de cultivo, donde los que presentan mayor superficie plantada en la región y en las comunas estudiadas, son de los más exigentes en cuanto al agua requerida para su correcta formación y desarrollo, destacándose el Palto y el naranja que pueden llegar a necesitar hasta 12.000 m³ por hectárea cultivada. Como se propuso anteriormente, para mitigar la sequía de la zona, es prioritario una reestructuración en las especies que se cultivan en las comunas de la V región por especies que requieran un menor requerimiento de agua y tengan mayor resistencia al déficit hídrico, como el caso de la Tuna, que es de las especies que necesitan menor cantidad de agua por hectárea cultivada, se necesita hasta 3.000 m³ por hectárea, valor que es hasta 4 veces menor que lo requerido por las especies que están más presentes en las comunas. Este hecho genera alternativas en el cambio del curso de la actividad agrícola de la región de Valparaíso por una gestión y producción agrícola más consciente y acorde al momento que se vive con la sequía.

Tabla 8: Requerimiento hídrico anual de cultivos frutícolas por hectárea de cultivo (Ministerio de agricultura, 2020)

Cultivo	Requerimiento hídrico (m ³ /ha/año)
Tuna	2.500 a 3.000
Jojoba	3.000 a 4.500
Granado	3.500 a 8.000
Quinoa	4.500 a 7.500
Olivo	6.000 a 8.000
Higuera	7.000 a 8.000
Palto	7.000 a 11.000
Nogal	7.000 a 11.000
Uva	7.000 a 12.000
Naranja	9.000 a 12.000

Acorde a lo presentado anteriormente, en la Figura 25 se presenta la distribución de superficie cultivada de tuna en las 3 comunas estudiadas, donde se ve la predominancia de esta en La Ligua, teniendo el 76% de superficie de este cultivo en comparación al 24% de la comuna de Petorca, mientras que en la comuna de Quillota prácticamente no presentan (Ministerio de agricultura, 2020).

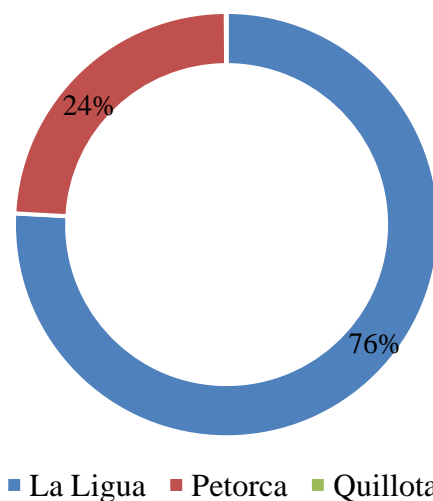


Figura 25: Distribución de superficie cultivada de tuna en comunas de estudio (Ministerio de agricultura, 2020)

En base a los antecedentes recolectados de las variables meteorológicas y actividad agrícola de las comunas en estudio, la selección de la zona y cultivo para realizar la evaluación técnico-económica es la comuna de La Ligua y la tuna respectivamente.

La Tuna, cuyo nombre científico es *Opuntia ficus-índica* es un cactus de origen americano que se ha cultivado para la producción de fruta, forraje, por su uso como hospedero de la cochinilla del carmín, insumo para la generación de biocombustibles y también para detener procesos de desertificación. (Víctor Muñoz, 2022)

Este cultivo presenta muchas propiedades como una alta concentración de vitamina C, vitamina E, pigmentos, polifenoles y taurina, además, su consumo fortalece los huesos, mejora la digestión disminuye el colesterol malo y actúa como antiácido y antioxidante.

Todo este conjunto de propiedades y beneficios podrían desempeñar un papel importante si se le considerara como un alimento más funcional y relevante.

En cuanto a las condiciones climáticas para su óptimo desarrollo, es necesaria una temperatura media anual entre 16 y 28°C, una precipitación pluvial media anual de 150 y 1800 mm y una altitud de la zona entre 800 y 1800 msnm. Sin embargo, este cultivo prolifera en condiciones extremas que es uno de los atractivos principales que posee esta fruta. (Víctor Muñoz, 2022)

5.1.2. Selección de tecnología

En base a las características presentadas anteriormente para las distintas tecnologías de captación de agua atmosférica estudiadas junto con la Tabla 5 con sus principales ventajas, desventajas y capacidades medias de producción de agua, se comparan todos los métodos de captación de agua atmosférica. Considerando la demanda objetivo de agua, además de las características climáticas de la comuna de la Ligua, se procede a comparar los dos métodos de la captación activa (VCC y TEC), ya que son los que más se destacan en cuanto a su producción de agua y rango de operación.

La tasa de captación de agua en la refrigeración por compresión es mucho mayor que la de refrigeración termoeléctrica y utiliza menor cantidad de energía eléctrica, además de ser una tecnología más conocida y presente en el mercado.

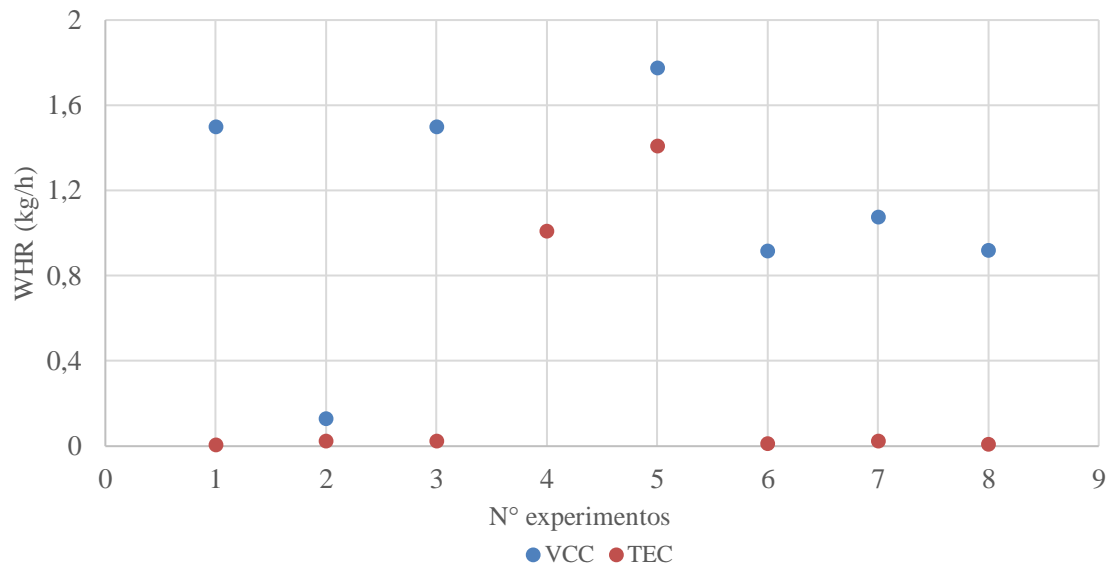


Figura 26: Tasa de captación de agua de tecnologías de captación activa (Peeters, 2020)

5.2. Descripción del proceso

Se diseñó un sistema AWG simple basado en el método de ciclo de compresión de vapor (VCC) seleccionado utilizando el refrigerante R134a, el diagrama de proceso utilizado para la realización del diseño se presenta en la Figura 27.

El ciclo de compresión mecánica simple, o ciclo de Rankine inverso es la aplicación real del ciclo ideal de Carnot inverso. El funcionamiento de esta tecnología se basa en que el aire ambiente con condiciones de entrada de Temperatura y humedad relativa de 18°C y 67% respectivamente (Flujo 5) circula primero por el evaporador del sistema, en este equipo el aire se enfría por debajo de su temperatura de punto de rocío para que el vapor de agua presente en el aire se condense saliendo del evaporador por sistema de goteo hacia un embudo para que posteriormente el caudal de agua sea dirigido a un tanque de almacenamiento (Flujo 7) para su posterior uso agrícola en la zona seleccionada. A continuación, el aire circula a través del otro equipo intercambiador de calor del ciclo correspondiente al condensador, donde el refrigerante que circula por este equipo cede calor al aire provocando una disminución en la temperatura del refrigerante hasta su estado de líquido saturado, siendo el aire finalmente descargado al ambiente.

El ciclo de compresión de vapor se compone de cuatro procesos básicos, en cuanto a las

condiciones de operación de temperatura y presión para la entrada y salida de cada etapa, estas se presentan con mayor detalle en la sección 5.5. A continuación, se especifican las etapas del proceso.

- El refrigerante en estado de vapor saturado (-26°C , 1 bar) ingresa al compresor isoentrópico donde aumenta su presión y temperatura y sale del equipo en estado de vapor sobrecalentado ($16,9^{\circ}\text{C}$, 4 bar). Este aumento de su presión está directamente relacionado con la relación de presión del compresor los cuales normalmente presenta valores entre 1 y 10 y corresponde a la división de la presión de salida y la presión de entrada del compresor, la relación de presión que se utilizó fue de 4, es decir, la presión a la salida del compresor era 4 veces la presión de entrada a este.
- Una vez que el flujo de refrigerante es expulsado del compresor como vapor sobrecalentado, ingresa al condensador donde cede calor al ambiente a presión constante cambiando su estado a líquido saturado ($9,3^{\circ}\text{C}$, 4 bar).
- Luego el flujo ingresa a un proceso de expansión isoentálpica en una válvula de expansión donde el fluido refrigerante cambia su estado a una mezcla Líquido vapor (L-V) disminuyendo su presión y temperatura (-26°C , 1 bar).
- Finalmente, para completar el ciclo el refrigerante ingresa al evaporador donde absorbe calor a presión y temperatura constante.

Estos procesos dentro del ciclo de compresión de vapor se denominan etapas, las cuales son:

- Etapa 1-2: Compresión isoentrópica del fluido refrigerante en un compresor.
- Etapa 2-3: Rechazo de calor a presión constante en un condensador.
- Etapa 3-4: Expansión isoentálpica en una válvula de expansión.
- Etapa 4-1: Recepción de calor a presión constante en un evaporador.

El proceso de incorporación del flujo de aire al evaporador del sistema de compresión de vapor (el cual entra con las condiciones mencionadas anteriormente de temperatura de bulbo seco y humedad relativa) corresponde a un proceso de deshumidificación del aire de la atmosfera, produciendo un aumento de la humedad relativa al 100% a la salida del evaporador y una disminución de la humedad absoluta, ya que, al salir del equipo con una temperatura por debajo de la temperatura de punto de rocío, parte del vapor de agua

contenido en el aire que ingresa al evaporador se condensa, logrando así la recolección de agua.

5.3. Demanda por abarcar

Para comenzar con el cálculo del diseño de la tecnología de captación de agua atmosférica, primero se tiene que saber la cantidad necesaria de agua para abastecer a las hectáreas del cultivo seleccionado.

El sistema que se quiere diseñar tiene el propósito de suministrar agua obtenida de la tecnología para poder destinarlo a producción agrícola de bajo consumo de agua y así aportar con la actividad productiva y la economía local, además de fomentar el cultivo de especies que requieren menor cantidad de agua para ser cultivadas con el propósito de disminuir la brecha hídrica de la zona afectada.

Para la estimación de las hectáreas a abarcar del cultivo seleccionado, que es la tuna, se debe tener presente los valores presentados en la sección de metodología de trabajo, como el requerimiento hídrico de las especies frutícolas y el catastro de las hectáreas cultivadas en la comuna.

Se abarcó sólo una pequeña parte de lo catastrado hasta el año 2020, de las 13 hectáreas aproximadamente de superficie total de cultivo de tuna en la comuna de La Ligua, el porcentaje de superficie de cultivo abarcado es del 2% correspondiente a 0,25 hectáreas.

Considerando que en el catastro frutícola realizado el año 2017 se estimó que la superficie cultivada de tuna en La Ligua era de 11,4 hectáreas, indica que en el período de tiempo que separa ambos catastros, es decir, entre 2017 y 2020, se realizó un cultivo de 1,4 hectáreas, lo que se traduce a un valor estimado de 0,36 hectáreas al año, por lo que, con el uso de la tecnología de captación de agua atmosférica seleccionada se estaría cubriendo el 70% del cultivo anual estimado. (Ministerio de agricultura, 2020)

Con los datos presentados anteriormente respecto a la superficie abarcada de cultivo de tuna en la comuna, junto con sus requerimientos, se calculó el consumo de agua necesario para suplir la demanda establecida.

Tabla 9: Resultados obtenidos para abarcar demanda de tuna

Parámetros	Valor
Superficie cultivada de tuna en La Ligua (ha)	12,48
Porcentaje abarcado del total comunal	2%
Superficie abarcada (ha/año)	0,25
Requerimiento hídrico tuna (m ³ /ha/año)	3000
Consumo anual de agua (m ³ /año)	754
Flujo másico de agua (kg/h)	85,83
Consumo diario de agua (m ³ /día)	2,1
Sobredimensionamiento	5%
Capacidad de producción VCC (kg/h) (Objetivo)	90,13

5.4. Fluidos utilizados

Los fluidos utilizados para el proceso de refrigeración activa mediante ciclo de compresión fueron dos, los que se describen a continuación.

5.4.1. Aire atmosférico

El aire proveniente de la atmosfera, del cual se obtiene el agua condensada. Los parámetros de entrada y salida del aire del evaporador se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Condiciones de entrada y salida de aire seco al proceso

Variable	P ₅	P ₆
Temperatura bulbo seco (°C)	18	7,5
Temperatura bulbo húmedo (°C)	14,3	7,5
T rocío (°C)	11,8	7,5
HR (%)	67%	100%
H abs (kg vapor /kg)	0,0086	0,0064
Entalpía (kJ/kg)	40	23,6
Densidad (kg/m ³)	1,206	1,253
Volumen (m ³ /kg)	0,836	0,803

5.4.2. Refrigerante

El refrigerante seleccionado fue el R134a que circula por el sistema, cuya principal función es la transferencia de calor a los alrededores y al flujo de aire que pasa por los intercambiadores de calor.

El gas refrigerante R-134a es un HFC que sustituye al R-12 en instalaciones nuevas. Sus principales características y que la destacan de otros refrigerantes presentes en el mercado es que no daña la capa de ozono, tiene una gran estabilidad térmica y química, una baja toxicidad y no es inflamable. Es muy utilizado en el aire acondicionado de los automóviles y en refrigeradores domésticos. También se utiliza mucho en chillers del sector industrial y comercial. En la Tabla 11 se presenta la ficha técnica del refrigerante utilizado (Gasservei, 2023).

Tabla 11: Ficha técnica gas refrigerante R134a (Gasservei, 2023)

Parámetros	Valor
Peso Molecular	102,03
Punto de ebullición (°C)	-26,2
Punto de congelación (°C)	-103
Temperatura crítica (°C)	101,1
Presión crítica (bar)	40,60
Densidad del líquido 25°C (kg/m ³)	1,206
Densidad del líquido 0°C (kg/m ³)	1,293
Densidad del vapor 25°C (kg/m ³)	5,28
Vaporización de calor BP (KJ/Kg)	217,2
Presión de vapor 25°C (bar)	6,657
Presión de vapor 0°C (bar)	2,92
ODP	0
GWP	1430

5.5. Equipos utilizados

Los equipos presentes en la tecnología utilizada junto a su código en el PFD y su función se presentan a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12: Descripción de equipos involucrados en el proceso

Código	Equipo	Función
F-01	Filtro de aire	Remueve partículas grandes, polvo y contaminantes del aire
HE-01	Evaporador	El aire le cede calor al refrigerante cambiándolo de fase a gas
C-01	Compresor	Circular el refrigerante por todo el ciclo de compresión
HE-02	Condensador	Cambio de estado de refrigerante de gas a líquido
V-01	Válvula de expansión	Reduce presión y temperatura de fluido refrigerante
TK-01	Tanque de almacenamiento	Asegurar la recepción del agua condensada del evaporador
-	Ventilador	Permite mayor flujo de ingreso de aire al ciclo

Cabe destacar que para las especificaciones del circuito de enfriamiento que lo componen principalmente los dos intercambiadores de calor (Evaporador y condensador) y válvula de expansión isoentálpica, se contempla como un sistema integrado en cuanto a sus especificaciones, por lo que se presenta resumido en la sección a continuación, en cuanto a los equipos que requiere energía eléctrica correspondiente al compresor y los ventiladores axiales, las especificaciones se muestran para cada uno de estos dos equipos al igual que

para el tanque de almacenamiento de condensado.

Las especificaciones descritas para los equipos de la tecnología se estimaron en base a los resultados del presente estudio, complementado con búsqueda bibliográfica de equipos AWG y equipos auxiliares con características de capacidad similares.

5.5.1. Especificaciones técnicas ciclo de enfriamiento

Tabla 13: Parámetros tecnología AWG (AWG Australia, 2023)

Características	Valor
Refrigerante	R134a
Condiciones de trabajo	T= [15-45] °C HR= [25-100] %
Tipo	Ciclo de compresión de vapor
Mecanismo de expansión	Válvula termostática
Generación máxima establecida	100 L/h
Capacidad de flujo de aire	34.000 m ³ /h

5.5.2. Especificaciones técnicas compresor

Tabla 14: Parámetros compresor (Cenfrico, 2023)

Características	Valor
Material	Acero inoxidable
Tipo	Centrifugo
Voltaje	380 V/III/60 Hz
Relación de presión	4
Eficiencia	80%
Potencia	40 kW

5.5.3. Especificaciones técnicas ventilador

Tabla 15: Parámetros ventilador (ALG, 2023)

Características	Valor
Material hélice	Acero inoxidable
Diámetro hélice	905 mm
Tipo	Centrifugo de 3 hélices
Voltaje	380 V/III/60 Hz
Capacidad máxima	34.000 m ³ /h

5.5.4. Especificaciones técnicas tanque de almacenamiento

Tabla 16: Parámetros tanque de almacenamiento (BioPlastic, 2023)

Características	Valor
Material	Polietileno LLDPE
Altura	1.570 mm
Diámetro	1.640 mm
Tipo	Vertical estándar
Capacidad	2,4 m ³

5.5.5. Especificaciones técnicas dimensiones tecnología

Tabla 17: Dimensiones de tecnología de ciclo de compresión sin tanque de almacenamiento

Características	Valor
Altura	2,58 m
Largo	2,56 m
Ancho	3,05 m
Peso	1.700 kg

5.6. Diagrama de flujo

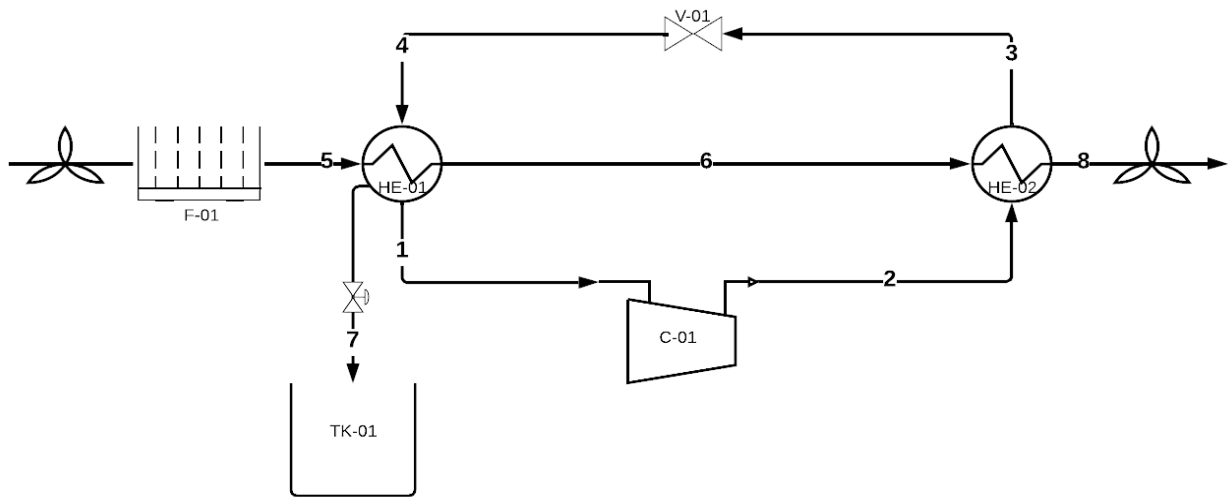


Figura 27: PFD Proceso de captación de agua atmosférica mediante ciclo de compresión

Se presentan las principales variables calculadas en base al diagrama de Mollier del refrigerante presentado en el *Anexo B* junto con el flujo másico de cada una de las corrientes involucradas en el proceso.

Tabla 18: Variables de flujo de refrigerante R134a dentro del sistema VCC

Flujo	Estado	T (°C)	P (bar)	Calidad
1	Vapor saturado	-26,075	1,0132	1
2	Vapor sobrecalentado	16,919	4,0528	-
3	Líquido saturado	9,32	4,0528	0
4	Líquido-Vapor	-26,075	1,0132	0,216

Tabla 19: Variables del aire a la entrada y salida

Flujo	Fluido	T (°C)	P (bar)
5	Aire atmosférico	18	1,0132
6	Aire seco frío	7,5	1,0132
7	Agua condensada	7,5	1,0132
8	Aire seco caliente	17,5	4,0528

Tabla 20: Flujos máscicos y volumétricos de las corrientes involucradas en el proceso de captación de agua atmosférica

Flujo	F (kg/h)	q (m ³ /h)
1	3.856	733
2	3.856	203
3	3.856	3
4	3.856	161
5	40.171	33.623
6	40.171	32.257
7	90,13	0,09
8	40.171	32.257

5.7. Balance de masa y energía

La realización de los balances de masa tiene como fin de determinar el flujo de refrigerante necesario que debe circular por el ciclo, además de los flujos de vapor de agua y aire seco que atraviesan los equipos intercambiadores de calor, en cuanto a los balances de energía, estos permitieron calcular el calor cedido y absorbido por los fluidos participantes del ciclo, además del trabajo de eje del compresor necesario para hacer circular el flujo de refrigerante calculado, se desarrollaron los cálculos para todas las etapas del proceso del ciclo de compresión.

A continuación, se expone de manera detallada cada una de las ecuaciones y balances de masa y energía de todos los equipos que componen el sistema.

- **Evaporador**

El balance de masa del aire seco, vapor de agua y refrigerante de este equipo se presenta a continuación:

$$\text{Aire seco: } m_{AS_5} - m_{AS_6} = 0 \quad (1)$$

$$m_{AS_5} = m_{AS_6} = m_{AS} \quad (2)$$

Al no haber pérdida ni adición de aire, el flujo de aire seco que ingresa y sale del evaporador es el mismo, solo cambia la cantidad de vapor de agua contenida en los flujos, donde el flujo que sale del evaporador presenta una menor humedad absoluta que el flujo que ingresa, esto debido que parte de ese vapor de agua se condensa, generando así el agua atmosférica.

$$\text{Vapor de agua: } m_{v_5} - (m_{v_6} + m_{v_7}) = 0 \quad (3)$$

Para obtener los flujos de vapor de agua se obtiene multiplicando el flujo de aire seco por la humedad absoluta de cada flujo, las cuales se obtienen en base a las condiciones climatológicas de entrada y salida del evaporador mediante cálculos realizados en la carta psicrométrica presentados en el *anexo A*.

$$m_{v_5} = m_{AS} \cdot \omega_5 \quad (4)$$

$$m_{v_6} = m_{AS} \cdot \omega_6 \quad (5)$$

Reemplazando las ecuaciones se obtiene la siguiente expresión correspondiente al balance de masa de vapor de agua del evaporador.

$$m_{AS} \cdot (\omega_5 - \omega_6) - m_{v_7} = 0 \quad (6)$$

Despejando m_{AS} se puede obtener el flujo de aire seco necesario a ingresar al ciclo de compresión de vapor (VCC) para obtener agua atmosférica, en base a m_{v_7} que es el flujo de agua condensada obtenida, que es un dato calculado en base al requerimiento hídrico del cultivo de la localidad seleccionada.

$$m_{AS} = \frac{m_{v_7}}{(\omega_5 - \omega_6)} \quad (7)$$

$$m_{v_7} = m_{agua} \quad (8)$$

Para el balance de masa del refrigerante, al no interactuar este flujo con el flujo objetivo ingresado que es el aire atmosférico y al suponer que no hay pérdida ni adición de refrigerante se tiene.

$$\text{Refrigerante: } m_4 - m_1 = 0 \quad (9)$$

$$m_4 = m_1 = m_{Ref} \quad (10)$$

Para el balance de energía del evaporador solo se presenta la energía calorífica en forma de calor y las entalpías específicas de los flujos entrantes y salientes, ya que no hay trabajo de eje en este equipo. A continuación, se presenta el balance de energía para el aire seco dentro del evaporador.

$$Q_{evap_{AS}} + (m_{AS} \cdot h_5) - (m_{agua} \cdot h_{agua}) - (m_{AS} \cdot h_6) = 0 \quad (11)$$

Despejando el calor cedido por el aire se tiene la siguiente expresión.

$$Q_{evap_{AS}} = m_{AS} \cdot (h_6 - h_5) + m_{agua} \cdot h_{agua} \quad (12)$$

Este calor cedido por el aire es igual al calor absorbido por el refrigerante dentro del ciclo de compresión de vapor.

$$Q_{evap_{AS}} = -Q_{evap_{Ref}} \quad (13)$$

Siendo el calor absorbido por el refrigerante el siguiente.

$$Q_{evap_{Ref}} + (m_{Ref} \cdot h_4) - (m_{Ref} \cdot h_1) = 0 \quad (14)$$

Al tener el $Q_{evap_{Ref}}$ se puede despejar la masa del refrigerante necesaria en el proceso, teniendo la siguiente expresión.

$$m_{Ref} = \frac{Q_{evapRef}}{(h_1 - h_4)} \quad (15)$$

- **Compresor**

El balance de masa del refrigerante se presenta a continuación:

$$\text{Refrigerante: } m_1 - m_2 = 0 \quad (16)$$

$$m_1 = m_2 = m_{Ref} \quad (17)$$

Para el balance de energía solo se presenta el trabajo de eje realizado por el compresor y las entalpías específicas de los flujos entrantes y salientes. A continuación, se presenta el balance de energía para el compresor.

$$-W_{compresor} + (m_{Ref} \cdot h_1) - (m_{Ref} \cdot h_2) = 0 \quad (18)$$

$$W_{compresor} = m_{Ref} \cdot (h_1 - h_2) \quad (19)$$

- **Condensador**

El balance de masa del aire seco, vapor de agua y refrigerante de este equipo se presenta a continuación:

$$\text{Aire seco: } m_{AS_6} - m_{AS_8} = 0 \quad (20)$$

$$m_{AS_6} = m_{AS_8} = m_{AS} \quad (21)$$

Al no haber pérdida ni adición de aire el flujo de aire seco que ingresa y sale del evaporador es el mismo, solo cambia la cantidad de vapor de agua contenida en los flujos, donde el flujo que sale del evaporador presenta una menor humedad absoluta que el flujo que ingresa, esto debido que parte de ese vapor de agua se condensa, generando así el agua atmosférica.

$$\text{Vapor de agua: } m_{v_6} - m_{v_8} = 0 \quad (22)$$

$$m_{v_6} = m_{AS} \cdot \omega_6 \quad (23)$$

$$m_{v_8} = m_{AS} \cdot \omega_8 \quad (24)$$

Reemplazando las ecuaciones se obtiene la siguiente expresión correspondiente al balance de masa de vapor de agua del evaporador.

$$m_{AS} \cdot (\omega_6 - \omega_8) = 0 \quad (25)$$

$$\omega_6 = \omega_8 \quad (26)$$

Para el balance de masa del refrigerante, al no interactuar este flujo con el flujo objetivo ingresado que es el aire seco proveniente del evaporador y al no haber pérdida ni adición de refrigerante se tiene:

$$\text{Refrigerante: } m_2 - m_3 = 0 \quad (27)$$

$$m_2 = m_3 = m_{Ref} \quad (28)$$

Para el balance de energía del condensador solo se presenta la energía calorífica en forma de calor y las entalpías específicas de los flujos entrantes y salientes, ya que no hay trabajo de eje en este equipo. A continuación, se presenta el balance de energía para el aire seco y el refrigerante dentro del condensador respectivamente.

$$Q_{cond_{AS}} + (m_{AS} \cdot h_6) - (m_{AS} \cdot h_8) = 0 \quad (29)$$

$$Q_{cond_{Ref}} + (m_{Ref} \cdot h_2) - (m_{Ref} \cdot h_3) = 0 \quad (30)$$

$$Q_{cond} = m_{Ref} \cdot (h_3 - h_2) \quad (31)$$

- **Válvula de expansión**

El balance de masa de este equipo, al solo pasar el refrigerante y no tener contacto con el aire es el siguiente.

$$\text{Refrigerante: } m_3 - m_4 = 0 \quad (32)$$

$$m_3 = m_4 = m_{Ref} \quad (33)$$

Para el balance de energía de la válvula de expansión solo se presenta las entalpías específicas de los flujos entrantes y salientes, ya que no hay trabajo de eje en este equipo ni calor absorbido o cedido por el equipo con el ambiente. A continuación, se presenta el balance de energía para el refrigerante dentro de la válvula.

$$(m_{Ref} \cdot h_3) - (m_{Ref} \cdot h_4) = 0 \quad (34)$$

$$h_3 = h_4 \quad (35)$$

- **Tanque de almacenamiento**

El balance de masa del aire seco, vapor de agua y refrigerante de este equipo se presenta a continuación:

$$\text{Agua condensada: } m_{agua} = \frac{dm}{dt} \quad (36)$$

$$t = \frac{\rho \cdot \pi \cdot (D_t)^2 \cdot z}{4 \cdot m_{agua}} \quad (37)$$

En cuanto a los servicios utilizados para que se pudiera recolectar el agua proveniente de la atmosfera corresponde a la electricidad, la cual permite el funcionamiento del compresor y de los ventiladores axiales del proceso.

Al momento de realizar los cálculos se hicieron suposiciones tanto transversales como particulares para los equipos que componen el sistema con el fin de simplificar su operación y el cálculo de las variables termodinámicas.

- El sistema funciona en estado estacionario, es decir, no existe acumulación en ningún equipo (excepto en el tanque de almacenamiento de agua atmosférica), por lo que la acumulación de masa en el tiempo se puede despreciar haciendo que $\frac{dm}{dt} = 0$.

- La compresión en el compresor y la expansión en la válvula de expansión se asumen como procesos adiabáticos, es decir, no existe intercambio de calor con el entorno.
- Se desprecia el sobrecalentamiento del vapor a la salida del evaporador y del subenfriamiento del condensado a la salida del condensador, por lo que para motivos de cálculos se consideran como saturados.

5.8. Potencia requerida

Los servicios utilizados para que se pudiera recolectar el agua proveniente de la atmosfera, es la energía eléctrica, la cual permite el funcionamiento del compresor y de los ventiladores axiales del proceso. Se presenta en la Tabla 21 las potencias netas de ambos equipos.

Tabla 21: Potencia máxima consumida por equipos

Equipo	Potencia (kW)
Compresor ideal	30,22
Eficiencia	80%
Compresor real	37,78
Ventilador (2)	8
Total	45,78

Para los cálculos de la electricidad consumida por la máquina, hay que destacar que los cálculos realizados para satisfacer el volumen de agua condensada por el sistema propuesto se hicieron en régimen continuo y suponiendo que funciona a todo momento, sin embargo, para la estimación de la energía consumida se tendrá en consideración las posibles detenciones de la tecnología debido a temperaturas de punto de rocío más bajas de 4°C del aire que ingresa en el evaporador, lo que significaría una detención de la producción del agua y por ende de la electricidad consumida por el equipo. Además de no trabajar al 100% de su rendimiento por la variabilidad de las condiciones climatológicas de entrada del aire atmosférico durante el día y las distintas estaciones del año. En base al análisis y comparación de distintas búsquedas bibliográficas de tecnologías de AWG, se estimó un consumo nominal de 0,22 kWh por litro de agua producida.

5.9. Análisis de resultados

Considerando todas las tecnologías presentadas en el marco teórico para la captación de agua proveniente de la atmósfera junto con el análisis de ellas realizadas en la metodología de trabajo se estimó que la que presentaba una mayor tasa de captación de agua era la tecnología de refrigeración activa mediante el método de ciclo de compresión de vapor (VCC).

Se logró establecer la demanda a cumplir por la tecnología mediante el catastro frutícola y características del cultivo seleccionado, además de las distintas variables termodinámicas asociadas al ciclo.

Para obtener los $2 \text{ m}^3/\text{día}$ establecidos se necesitó un flujo másico de aire seco que ingresa al sistema de 40.171 kg/h ($33.623 \text{ m}^3/\text{h}$), un flujo másico de refrigerante R134a que circula por el ciclo de 3.856 kg/h , además de una potencia máxima para los equipos consumidores de electricidad como el compresor y los ventiladores ubicados a los extremos del proceso de 46 kW .

Además, basado en las variables termodinámicas de entrada y salida de cada equipo involucrado en el proceso se comparó y complementó con equipos industriales presentes en la industria con el fin de tener más características de los equipos tales como material, voltaje dimensión, entre otros, lo que posteriormente se utilizó en la evaluación económica para la elaboración de los costos de los equipos para determinar la inversión inicial del proyecto.

6. ESTUDIO ECONÓMICO

6.1. Bases de evaluación económica

Las bases económicas del proyecto de la tecnología AWG para su uso por parte de empresas agrícolas para abastecer de agua sus cultivos de tuna consiste en prestar un servicio a estas empresas por el uso de la tecnología. En la Tabla 22 se presenta las bases con las cuales se realizó la evaluación económica.

Tabla 22: Bases evaluación económica

Criterio	Valor
Moneda seleccionada	Dólar Estadounidense (USD)
Periodo de evaluación	10 años
Impuestos	27%
Tasa de descuento	14%
Depreciación	Lineal
Inflación proyectada	3,04%
CAGR AWG	6%

CAGR: Tasa de crecimiento anual compuesto

6.2. Estructura de egresos e ingresos del proyecto

A continuación, se describen los ingresos percibidos asociados al proyecto y costos de operación, estos incluyen los servicios necesarios para el funcionamiento de la tecnología, equipos industriales involucrados para determinar la inversión estimada y los gastos de capital (CAPEX) y de operación (OPEX).

6.2.1. Estructura de egresos del proyecto

6.2.1.1. Costos de servicios

Para el costo de suministro de electricidad, se consideró la potencia eléctrica de cada equipo y el tiempo que se utilizarán durante el mes, comparando el costo del consumo eléctrico entre la tarifa de suministro eléctrico y el costo de la energía si esta fuera proporcionada por energía solar fotovoltaica se tiene una notable diferencia en cuanto a

costos de servicios por lo que los cálculos serán hechos considerando que la totalidad de la energía se suministra con energía solar fotovoltaica (Ministerio de energía, 2020).

En la Tabla 23 y Tabla 24 se presentan los costos para el suministro eléctrico de la compañía general de electricidad y de sistemas fotovoltaicos mediante modelo de negocios ESCO respectivamente.

En la Tabla 25 se presenta la comparación del costo anual para estas dos fuentes de energía, teniendo una diferencia en cuanto a gastos de operación al año. Siendo la más económica la suministrada por energía solar fotovoltaica la cual es la utilizada para el cálculo del OPEX.

Tabla 23: Tarifa suministro eléctrico CGE (CGE, 2023)

Parámetro	Valor	Unidad
Cargo mensual	1.324	\$/cliente
Cargo por uso de sistema de transmisión	23,633	\$/kWh
Cargo por electricidad consumida	91,862	\$/kWh
Consumo por litro	0,2	kWh/L
Litros producidos	60.000	L/mes
Consumo total	12.000	kWh/mes
Costo USD	1.719	USD/mes
Costo anual	20.631	USD/año

Tabla 24: Tarifa precios sistemas FV (Ministerio de energía, 2020)

Parámetro	Valor	Unidad
Costo energía FV	0,057	USD/kWh
Consumo total	12.000	kWh/mes
Costo mensual	684	USD/mes
Costo anual	8.208	USD/año

Tabla 25: Diferencia anual entre las fuentes de consumo eléctrico analizadas para el proyecto

Fuente consumo eléctrico	Distribuidora	Energía FV	Diferencia anual
Costo anual (USD/año)	20.631	8.208	12.423

6.2.1.2. Costos de refrigerante

Se consideró un sobredimensionamiento del 2% del flujo circulante del refrigerante en el proceso en caso de cualquier fuga en las tuberías, falla de equipo o detención del proceso por parámetros fuera de rango establecidos en cuanto a temperatura y humedad relativa.

El flujo del refrigerante R134a utilizado en la tecnología tiene un flujo de 3933 kg/h, el costo unitario utilizado fue de 1,5 USD/kg lo que da un costo total de servicio de 5.783 USD (FrioFlor, 2023).

6.2.1.3. Costos de equipos

Los equipos que se cotizaron fueron los principales en el proceso de recolección de agua, en la Tabla 26 se detalla los costos de los equipos presentes en el proceso.

Cabe destacar que las referencias utilizadas para la estimación de los costos de los equipos son en base a las presentadas en la sección 5.4 junto con otras referencias de equipos con características similares encontradas en el mercado y del libro guía utilizado en esta sección del cual se tiene la siguiente ecuación de dimensionamiento para estimar los costos de los equipos (Max S.Peters, 2003).

$$C_e = C \cdot S^n$$

Donde C_e corresponde al costo del equipo, C costo constante asociado al equipo, S parámetros característicos de tamaño y n índice asociado al equipo. En base a esa ecuación de dimensionamiento con los términos correspondientes a cada equipo, los cuales se encuentran en el Anexo C se obtuvo los siguientes costos.

Tabla 26: Estimación inversión para compra de equipos de proceso

Equipo	Cantidad	Costo total (USD)	Referencia
Filtro de aire	1	2.000	(Max S.Peters, 2003)
Compresor	1	18.071	(MFM REF, 2023)
Evaporador	1	21.150	(Max S.Peters, 2003)
Condensador	1	21.150	(Max S.Peters, 2003)
Válvula de expansión	1	2.000	(MFM REF, 2023)
Tanque de almacenamiento	1	292	(BIO PLASTIC, 2023)
Ventilador	2	5.600	(AIROLITE, 2023)
Tuberías	-	10.000	(Max S.Peters, 2003)
Sistema FV	1	24.150	(Ministerio de energía, 2020)
Costo equipos (E)		104.413	-

6.2.1.4. Gastos de capital (CAPEX)

Para la estimación del costo de inversión total del proyecto se basó parcialmente en las recomendaciones de costos para proyectos de ingeniería de procesos (Max S.Peters, 2003). En la Tabla 27 se presenta el costo asociado a cada gasto de inversión del proyecto siendo E el total de los costos de los equipos presentados en la Tabla 26.

Tabla 27: Estimación inversión inicial del proyecto (CAPEX) (Max S.Peters, 2003)

Componente	% E	Costo total (USD)
Costo equipos	100%	104.413
Instalación equipos	5%	5.221
Instalación eléctrica	10%	10.441
Instrumentación	10%	10.441
Costo directo		130.516
Ingeniería y supervisión	5%	5.221
Gastos legales	2%	2.088
Costo indirecto		7.309
Contingencia	3%	4.135

Costo total inversión (CAPEX)	141.960
--------------------------------------	----------------

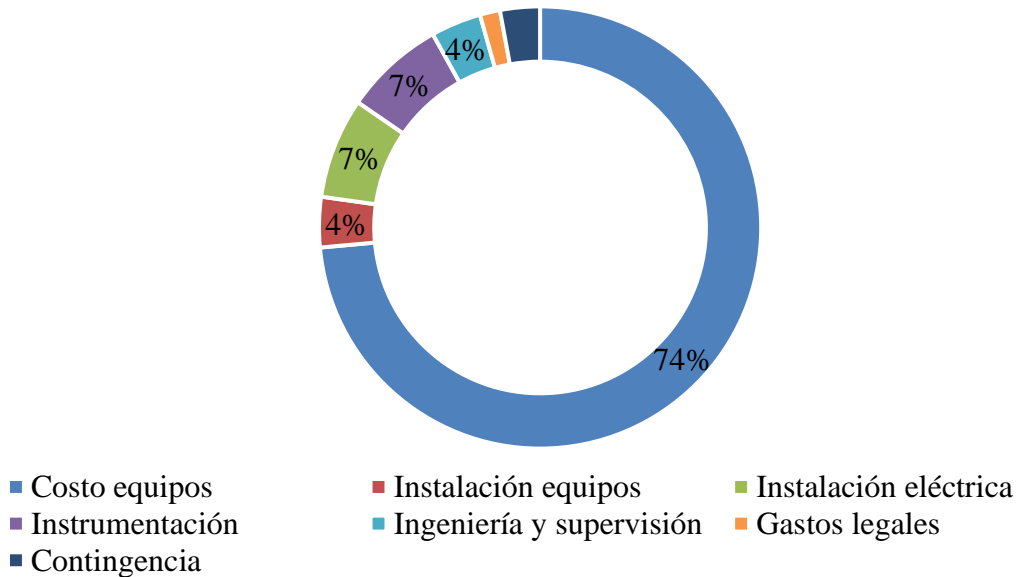


Figura 28: Distribución de gastos de inversión (CAPEX)

6.2.1.5. Gastos de operación (OPEX)

Para la estimación de los costos de operación del proyecto se considera, el precio asociado al servicio de electricidad de la zona, junto con el porcentaje asociado al costo de los equipos correspondiente a los mantenimientos de los equipos tanto preventivo como correctivo.

Tabla 28: Razones técnicas de costos operacionales del proyecto

Servicio	Razón técnica
Electricidad	0,2 kWh/L
Mantenimiento preventivo	2% E
Mantenimiento correctivo	2% E
Refrigerante	1,5 USD/kg

Tabla 29: Estimación gastos de operación (OPEX)

Componente	Costo total (USD/año)
Costo de electricidad	8.208
Mantenimiento preventivo	2.088
Mantenimiento correctivo	2.088
Refrigerante R134a	5.783
Costo total de operación (OPEX)	18.168

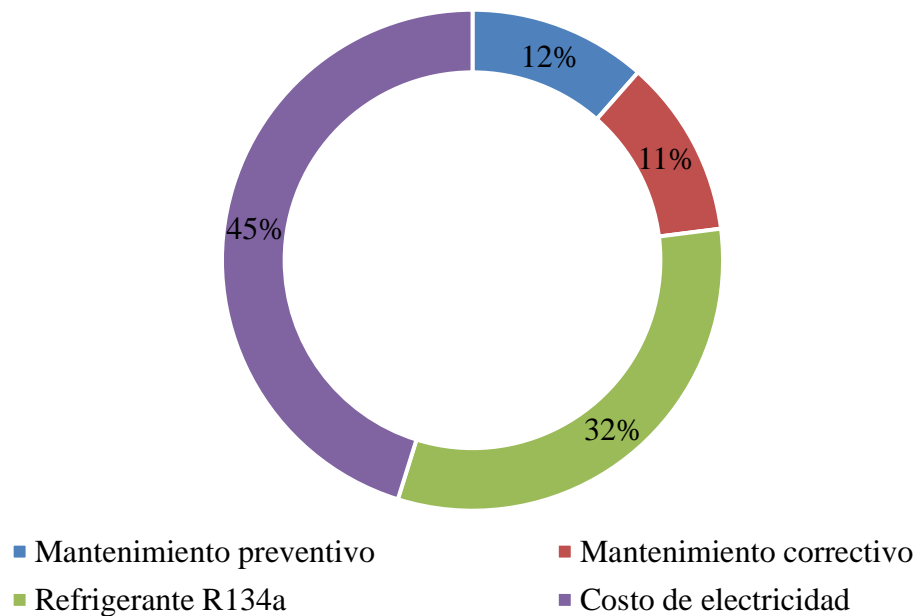


Figura 29: Distribución de costos de operación (OPEX)

6.2.2. Estructura de ingresos del proyecto

Debido al contexto en el que se implementa el proyecto, donde existe escasez de agua en la zona y considerando la irregularidad del costo del agua por parte de empresas de camiones aljibes sobre todo en la provincia de Petorca, es que para la estimación de los ingresos asociados al proyecto se cobrará a la empresa agrícola un arriendo mensual por el uso de esta tecnología, además de un costo por agua producida que sea beneficioso para ellos en cuanto a los otros costos ofrecidos en la zona correspondientes a empresas distribuidoras de agua potable o camiones aljibes.

Se estimó un porcentaje del total de la inversión estimada correspondiente al cargo

realizado al cliente agrícola por el uso de la tecnología de captación de agua atmosférica propuesta. Este cargo está asociado y afecto a cambios de acuerdo con la tasa de inflación anual proyectada al años 2033, la cual fue presentada en la sección 6.1 en las bases de la evaluación económica. En la Tabla 30 se presentan los ingresos anuales asociados al proyecto.

Tabla 30: Ingresos anual establecido por uso de tecnología AWG

Ingreso	% del CAPEX	Ingreso anual año 1 (USD/año)
Arriendo	3%	51.106

En base a la comparación de costo del agua de la empresa distribuidora de agua de la V región, y el costo irregular y poco controlado del agua transportada por camiones aljibes el cual corresponde a 12 USD/m³ en promedio, con valores máximos de hasta 20 USD/m³ se estimó un costo del agua proveniente de la tecnología propuesta que sea conveniente para la empresa agrícola. (María Christina Fragkou, 2022)

Este cargo está asociado y afecto a cambios de acuerdo con la tasa de inflación proyectada considerando un aumento anual de 3,04%, valor el cual se encuentra incluido del arriendo total de la tecnología (Statista, 2023).

Tabla 31: Ingreso anual de agua para uso agrícola

Ingreso	Costo específico agua (USD/m ³)	Ingreso anual año 1 (USD/año)
Uso de Agua atmosférica	5	3.719

Como ingresos totales al año 1 se tendrá la suma de los dos ingresos presentados anteriormente, los cuales año tras año irán aumentando en base a la inflación anual proyectada junto con la tasa de crecimiento anual de la tecnología.

Tabla 32: Ingresos totales al año 1

Ingreso	Ingreso anual año 1(USD/año)
Arriendo total	54.825

6.3. Depreciación de equipos utilizados

Los costos de vida útil y depreciación acelerada de los equipos involucrados en el proceso que se muestran a continuación se consultaron del servicio de impuestos internos (SII, 2003)

Tabla 33: Depreciación lineal y acelerada de equipos del proceso (SII, 2003)

Equipo	Depreciación lineal	Depreciación acelerada
Filtro de aire	15	5
Evaporador	10	3
Compresor	10	3
Condensador	10	3
Válvula de expansión	10	3
Tanque de almacenamiento	10	3
Ventilador	10	5
Tuberías	10	5
Sistema FV	10	3

6.4. Amortización

Es el proceso financiero mediante el cual se liquida, gradualmente, una deuda por medio de pagos periódicos. Se consideró una tasa de interés anual efectiva de 11,25%. (Banco Central, 2023)

Tabla 34: Parámetros para flujo de caja con financiamiento

Crédito	Largo plazo	Corto plazo
Financiado del CAPEX (%)	60%	
Monto financiado (USD)	85.176	
Tasa interés anual (%)	11,25%	
Plazo (años)	10	5
Cuota	14.615	23.191

6.5. Escenarios flujo de caja

Se estudiarán distintos escenarios para saber qué situación es más favorable para aumentar la rentabilidad del proyecto, los escenarios estudiados se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35: Escenarios propuestos para evaluación económica del proyecto

Escenario	Depreciación	Financiamiento	% Financiado	Plazo crédito
1	Lineal	No	-	-
2	Lineal	Si	60%	Largo plazo
3	Lineal	Si	60%	Corto plazo

6.6. Evaluación de indicadores

Comparando los indicadores económicos presentados en la Tabla 36 para los 3 escenarios analizados se logró determinar que el escenario que ofrece mejores indicadores es el escenario 2, que corresponde al proyecto financiado al 60% de la inversión inicial con un crédito a largo plazo.

Tabla 36: Indicadores económicos para distintos escenarios del proyecto

Escenario	VAN	TIR	Payback
1	-84.430 USD	5,8%	Año 8
2	88.103 USD	38,3%	Año 3
3	70.876 USD	30,1%	Año 5

6.7. Análisis de resultados

En relación con la prefactibilidad económica, mediante el flujo de caja para los distintos escenarios planteados, se obtuvo que el proyecto debe tener un financiamiento a largo plazo para optimizar los indicadores económicos, obteniéndose así un VAN de 88.103 USD, un TIR de 38,3% y un payback a los 3 años. Al presentar un VAN mayor que cero y un TIR mayor a la tasa de descuento utilizada para la evaluación, se considera un proyecto rentable. Una de las consideraciones más importantes a la hora de definir la inversión inicial y los gastos de operación fue la elección de la fuente de energía eléctrica asociada al proyecto, ya que al ser mediante tecnología de refrigeración activa uno de los principales obstáculos a la hora de realizar la evaluación económica era el costo de la energía puesto que presenta gran consumo eléctrico para la captación de agua de la atmosfera, por lo que se consideró el costo de consumo eléctrico suministrado por energía solar fotovoltaica, lo que aumentaba el CAPEX debido al costo asociado de equipos e instalaciones fotovoltaicas pero disminuía considerablemente el OPEX del proyecto.

Debido a la poca regulación en el costo del agua otorgado por las empresas de camiones aljibes presentes en la región y el escaso control y regulación de los derechos de agua a nivel nacional, es que, la inversión en la tecnología de cosecha de agua atmosférica por parte de la empresa de la tecnología AWG sea una opción posible y sobre todo necesaria.

Desde el punto de vista de las empresas agrícolas, teniendo presente el contexto hídrico de la zona y la inminente disminución de las fuentes de agua para actividad agrícola como se mencionó anteriormente, es que se hace necesario que las empresas inviertan en nuevas tecnologías que ofrezcan fuentes de agua alternativas como las tecnologías AWG, ya que, al no existir claridad sobre la disponibilidad continua de agua, se genera pérdidas de ganancias asociadas a los cultivos por degradación de los suelos y falta de riego.

Considerando el enfoque del proyecto, se considera una excelente alternativa a implementar para mitigar los efectos de la sequía, sin embargo, a nivel económico para la empresa agrícola que contrata el servicio, no es una opción tan viable en el presente debido a que aún se considera una tecnología emergente, además de presentar un costo de arriendo del equipo elevado debido a sus altos costos de operación.

Los ingresos que tendría la empresa agrícola que se abastece de agua con la tecnología

AWG suponiendo que toda el agua producida fuese exclusivamente para cultivos de Tuna en la comuna de La Ligua y se vendiera todo lo que se cultive, además de considerar las propiedades del cultivo, se tendría una ganancia por parte de la empresa agrícola entre 9.000 USD y 15.000 USD al año, ingreso el cual no alcanzaría para cubrir todo el arriendo anual del equipo, haciendo que este proyecto sea una opción no tan viable en la actualidad para las empresas agrícolas. Sin embargo, debido al contexto se vuelve una necesidad invertir en nuevas fuentes de agua. Por lo que se debe investigar un nuevo tipo de acuerdo entre empresa que presta el servicio y empresa agrícola para que ambos generen ingresos.

7. CONCLUSIONES

La comuna seleccionada del estudio es La Ligua debido principalmente porque es una de las provincias de Petorca más emblemáticas de la sequía y es la que presenta menor cantidad de precipitaciones al año según los datos proporcionados por Meteoblue. En cuanto a la elección del cultivo, es la tuna, ya que presenta un menor requerimiento hídrico, además de presentar mayor superficie cultivada en la comuna seleccionada.

Para la elección de la tecnología se concluye que la más adecuada fue la tecnología de refrigeración activa por compresión de vapor, siendo la que presenta mayor rango de operación y mayor tasa de producción de agua.

Para el diseño del sistema de la tecnología seleccionada, se tuvo como punto inicial cumplir la producción diaria de 2 m³/día establecida con la tecnología seleccionada siendo técnicamente factible con el sistema de ciclo de compresión diseñado.

Para cumplir la demanda de agua se necesitó un flujo de aire seco y de refrigerante de 40.171 kg/h y 3.856 kg/h respectivamente, consumiendo una potencia máxima por parte del sistema de 46 kW.

Se realizó una evaluación económica de la tecnología seleccionada, estimando sus gastos de capital (CAPEX) y gastos de operación (OPEX) los cuales fueron 141.960 USD y 18.168 USD respectivamente.

Para la elaboración del flujo de caja se analizan y comparan los tres escenarios presentados donde se selecciona el proyecto financiado a largo plazo ya que presenta mejores indicadores con un VAN y TIR 88.103 USD y 38,3% respectivamente y un retorno de la inversión al tercer año.

Se concluye que los resultados obtenidos en base a todos los cálculos, y supuestos hechos en el transcurso de la evaluación son favorables y presenta un retorno de la inversión para la empresa proveedora de la tecnología, no así para la empresa agrícola que contrata el servicio, por lo que se debe estudiar más a fondo ese punto de vista de la investigación y ver cual situación es la más favorable y viable económicamente para los agricultores.

Es necesario aclarar que, debido a los supuestos realizados tanto en el estudio técnico como en el económico se contemplan posibles errores de estimación en los cálculos.

8. REFERENCIAS

- Abhishek Dash, A. M. (2022). *ATMOSPHERIC WATER GENERATOR: To meet the drinking water requirements of a household in coastal regions of India*. Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, Rourkela.
- AIROLITE. (2023). *VENTILADOR CENTRIFUGO BAJA PRESION CASALS BVCR*. Obtenido de <https://airolite.cl/collections/ventiladores-centrifugos-baja-presion-1/products/ventilador-centrifugo-baja-presion-casals-bvcr?variant=41354709172429>
- ALG. (2023). Obtenido de <https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>
- Ariel Muñoz, K. K.-B.-G. (28 de Februry de 2020). *Water Crisis in Petorca Basin, Chile: The Combined Effects of a Mega-Drought and Water Management*. doi:<https://doi.org/10.3390/w12030648>
- Arrau Ingeniería - Hídrica consultores. (2021). *Diagnóstico Embalses Subterráneos Cuenca de los Ríos Ligua y Petorca, Provincia de Petorca*. Ministerio de agricultura. Comisión nacional de riego. Obtenido de https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/147469/CNR-0537_1.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- AWG Australia. (2023). Obtenido de <https://www.awgaustralia.com.au/our-range>
- Ayman F. Batisha. (2014). *Feasibility and sustainability of fog harvesting*. National Scientific Committee on Problems of the Environment, SCOPE, Egypt. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.01.002>
- Banco Central. (2023). *Tasa promedio transada en el mercado interbancario*. Obtenido de https://si3.bcentral.cl/Indicadoressiete/secure/Serie.aspx?gcode=TIP_BASE_1¶m=RQBxAGsAWgBEAHEAdQA2ADcALQBBAGUANgBIADkAOQBGAGUATwBhAEcAdgBfAGQAXwAjAHcAdQBKAEoAUQA3AEgARABSAGoAOQBRAFAdQBLADUAIwBQAHkASABSAG0AUgA1AEoANABhAHkAYwA0AHkARgBjAEkAUQAwAEEAeQBLA
- bay side fog collectors. (2023). Obtenido de <https://www.baysidefogcollectors.com/>
- BCN. (2018). *Situación de los recursos hídricos en Chile*. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25323/2/Informe_Recursos_Hidricos_en_Chile.pdf
- BCN. (2020). *Información territorial Región de Valparaíso*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5>
- BCN. (2021). *Región de Valparaíso, Clima y vegetación*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5/clima.htm>
- BCN. (2021). *Región de Valparaíso, Hidrografía*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5/relieve.htm>
- Ben Gido, E. F. (2016). *Assessment of atmospheric moisture harvesting by direct cooling*. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, Israel. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.029>
- Bergmair. (2014). *System analysis of membrane facilitated water generation from air humidity*. Centre of Excellence for Sustainable Water Technology, Agora 1, Leeuwarden, The Netherlands. doi:10.1016/J.DESAL.2014.02.007
- Bergmair, D. (2014). *System analysis of membrane facilitated water generation from air humidity*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.007>
- BIO PLASTIC. (2023). *ESTANQUE VERTICAL ESTANDAR 2400 LTS*. Obtenido de <https://www.bioplastic.cl/producto/estanque-vertical-estandar-2400-lts-eva2400>
- BioPlastic. (2023). Obtenido de <https://www.bioplastic.cl/producto/estanque-vertical-estandar->

5400-lts-evs5400#

- Casallas, I. (2021). *Experimental Parameter Tuning of a Portable Water Generator System Based on a Thermoelectric Cooler*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Cenfrico. (2023). Obtenido de <https://cenfrico.com/shop-full-width/idades-condensadoras-y-compresores/compresores-hermeticos/compresor-hermetico-maneurop-mtz80-380v-3f-60hz-r-134a-404a-507a-407c/>
- CEPIS. (2004). *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*. Lima. Obtenido de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202004.%20Guia%20de%20dise%C3%B1o%20para%20captaci%C3%B3n%20del%20agua%20de%20lluvia.pdf
- CGE. (2023). *Tarifas de Suministro Eléctrico a Precio de estabilización 2022 - 1 de julio de 2023*. Obtenido de <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2023/07/Tarifa-de-Suministro-Elctrico-a-Precio-de-estabilizacion-2023-vigente-desde-el-1-de-julio-2023.pdf>
- Ciren. (2023). *Recursos naturales comuna La Ligua*.
- Comité científico de cambio climático. (2022). *Desalinización: Oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile*. Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. Obtenido de https://estudiosurbanos.uc.cl/wp-content/uploads/2022/12/2022_Com-Cambio-Climatico_Informe-Desalinizacion_vfinal_compressed.pdf
- Consejo Regional Valparaíso. (2023). *Consejo Regional Valparaíso*. Obtenido de <http://www.corevalparaiso.cl/>
- DGA. (2023). *Decretos declaración zona de escasez vigente*. Obtenido de <https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonasEscasez/Paginas/default.aspx>
- Dia Milani. (2011). *Modelling framework of solar assisted dehumidification system to generate freshwater from 'thin air'*. Sydney: Faculty of Engineering and Information Technologies, School of Chemical and Biomolecular Engineering.
- Diagram, M. (2023). Obtenido de <https://www.mollier-diagram.com/>
- Ecología verde*. (2020). Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/desalinizacion-que-es-y-tipos-2689.html>
- Entezari, A. (2019). *Extraordinary air water harvesting performance with three phase sorption*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtener.2019.07.001>
- Envitech, C. (Septiembre de 2021). *EXTRACCIÓN, CRISTALIZACIÓN Y PROCESOS DE OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE LITIO*. Obtenido de <https://condorchem.com/es/blog/extraccion-cristalizacion-procesos-obtencion-compuestos-litio/>
- Esval. (2023). *Tarifa de agua*. Obtenido de <https://www.esval.cl/personas/necesito-ayuda/tus-boletas-y-cobros/tarifas/>
- FAO. (2023). *Organización der las naciones unidas para la alimentación y la agricultura*. Obtenido de <https://www.fao.org/water/es/>
- Farshid Bagheri. (2018). *Performance investigation of atmospheric water harvesting systems*. School of Mechatronic Systems Engineering, Simon Fraser University, Surrey, BC, Canada. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wri.2018.08.001>
- Federación de juntas de vigilancia. (2023). Obtenido de <https://www.federacionjuntas.cl/noticias/el-drama-de-la-escasez-hidrica-en-las-comunas-de-valparaiso>
- Fressehayé, M. (2014). *Fog-water collection for community use*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063>
- Gasservei. (2023). *Ficha técnica R134a*. Obtenido de <https://gas-servei.com/shop/docs/ficha-tecnica-r-134a-gas-servei.pdf>
- Gobierno Regional de Valparaíso. (2020). *Estrategia Regional de Desarrollo Región de Valparaíso 2020. Una Región Diversa*. Obtenido de https://proactiva.subdere.gov.cl/bitstream/handle/123456789/317/ESTRATEGIA_REGION

- AL_DE_DESARROLLO_REGION_DE_VALPARAISO.PDF?sequence=1&isAllowed=y
- liu, S. (2017). *Experimental analysis of a portable atmospheric water generator by thermoelectric cooling method*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.538>
- M Ejeian, R. W. (2021). *Adsorption-based atmospheric water harvesting*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.005>
- Macedonio F, B. A. (2017). *Membrane condenser configurations for water recovery from waste gases*. doi:10.1016/j.seppur.2017.03.009
- María Christina Frangkou, T. M.-T.-R.-A. (2022). *Abastecimiento de agua potable por camiones aljibes durante la megasequía. Un análisis hidrosocial de la provincia de Petorca, Chile*. Santiago: Universidad de Chile. doi:10.7764/eure.48.145.04
- Max S.Peters. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill Chemical Engineering Series.
- MeteoBlue. (2022).
- MFM REF. (2023). *Inicio/Compresores/Compresores de refrigeración/Bitzer/Bitzer Semiherméticos/6FE-40Y Bitzer Ecoline compresor R134a 400V-3-50Hz Part winding*.
- MFM REF. (2023). *MFM REF*. Obtenido de Inicio/Componentes/Válvulas de expansión/Electronic/Siemens/MVL661.20-2.5 Siemens válvulas electrónicas de la extensión 7/8" .
- Ministerio de agricultura. (2020). *Catastrro frutícola región de Valparaíso*. Valparaíso: Centro de información de recursos naturales CIREN. Obtenido de <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/70428/catastroFruticolaValpo2020.pdf>
- Ministerio de agricultura. (2020). *Información del catastro frutícola para la Región de Valparaíso*. Centro de información de recursos naturales. Obtenido de <https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/70428/catastroFruticolaValpo2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Ministerio de energía. (2020). *Indice de precios de sistemas fotovoltaicos (FV) conectados a la red de distribución comercializados en Chile*. Obtenido de https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/factsheet_idp_fv_2020.pdf
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile. (2015). *Política Nacional para los Recursos Hídricos*.
- MMA. (2021). *Explorador de Amenazas Climáticas*.
- MOP. (2017). *Situación de la demanda de recursos hídricos en Chile por parte de los principales usuarios*.
- MOP. (2021). *Balance de gestión integral*. DGA. Obtenido de https://www.dipres.gob.cl/597/articles-266830_doc_pdf.pdf
- Naciones Unidas. (2023). Obtenido de <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- ODEPA. (2022). *Encuesta de superficie hortícola*.
- ODEPA. (2022). *Superficie regional de cultivos anuales*.
- OMS. (2005). *TECNOLOGÍAS PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA*. Obtenido de https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/55270/OPSCEPIS05170_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Panez, A. (2017). *Politización de la crisis hídrica en Chile: Análisis del conflicto del agua en la provincia de Petorca*.
- Peeters, R. (2020). *Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour*. doi:<https://doi.org/10.1039/D0EW00128G>
- Peters, R., Vanderschaeghe, H., Rongé, J., & Martens, J. (2020). *Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour*. Centre for Surface Chemistry and Catalysis. doi:10.1039/D0EW00128G
- Precedence research. (2023). *Atmospheric Water Generator Market (By Product: Cooling Condensation, Wet Desiccation; By Capacity: Up to 60 Liters, 60-500 Liters, 500-1000*

- Lters, More Than 1000 Liters; By Application: Industrial, Commercial, Residential) - Global Industry Analysis, Siz.*
- R Ziatdinov, R. N.-s. (2019). *The Concept of a Dew Collection Device Based on the Mathematical Model of Sliding Liquid Drops on an Inclined Solid Surface*. Department of Industrial and Management Engineering, Keimyung University. doi:10.1088/1755-1315/272/2/022091
- Raveesh G, G. R. (2023). *ATMOSPHERIC WATER GENERATION: CONCEPTS AND CHALLENGES*. doi:10.1615/thermopedia.010265
- Reckmann, O. (2023). *Pozos de captación de agua subterránea*. Obtenido de <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7272/NR36472.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- SEA. (2023). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA CONSIDERACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SEIA*. Obtenido de https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/01/13/MET-Guia-Cambio-Climatico_2023.pdf
- SII. (2003). *VIDA ÚTIL DE LOS BIENES FÍSICOS DEL ACTIVO INMOVILIZADO*. Obtenido de https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm
- Spletzer, B. L. (2001). *Albuquerque, US Patente nº US 6,230,503 B1*.
- Statista. (2023). *Evolución anual de la tasa de inflación en Chile desde 2015 hasta 2028*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/1189953/tasa-de-inflacion-chile/>
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo. (2021). Obtenido de <https://www.subdere.gov.cl/divisi%C3%B3n-administrativa-de-chile/gobierno-regional-de-valpara%C3%ADso/provincia-de-quillota>
- Terram. (2022). *Balance ambiental 2022*. Obtenido de <https://media.elmostrador.cl/2022/12/Balance-Ambiental-2022-Las-apuestas-del-Gobierno-Ecologista.pdf>
- Valparaiso, G. R. (2022). Obtenido de <http://www.gorevalparaiso.cl/region.php>
- Víctor Muñoz. (2022). *Frutales de bajo requerimiento hídrico: higuera y tuna*. Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Obtenido de <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6619/NR40750.pdf?sequence=10&isAllowed=y>
- Xiaoyi Liu, D. B. (2022). *Water Harvesting from Air: Current Passive Approaches and Outlook*. ACS Materials Letters 2022 4 (5), 1003-1024. doi:10.1021/acsmaterialslett.1c00850
- Zolfagharkhani, S. (2018). *Thermodynamic analysis and evaluation of a gas compression refrigeration cycle for fresh water production from atmospheric air*.

9. ANEXOS

9.1. ANEXO A: Cálculo propiedades psicrométricas aire

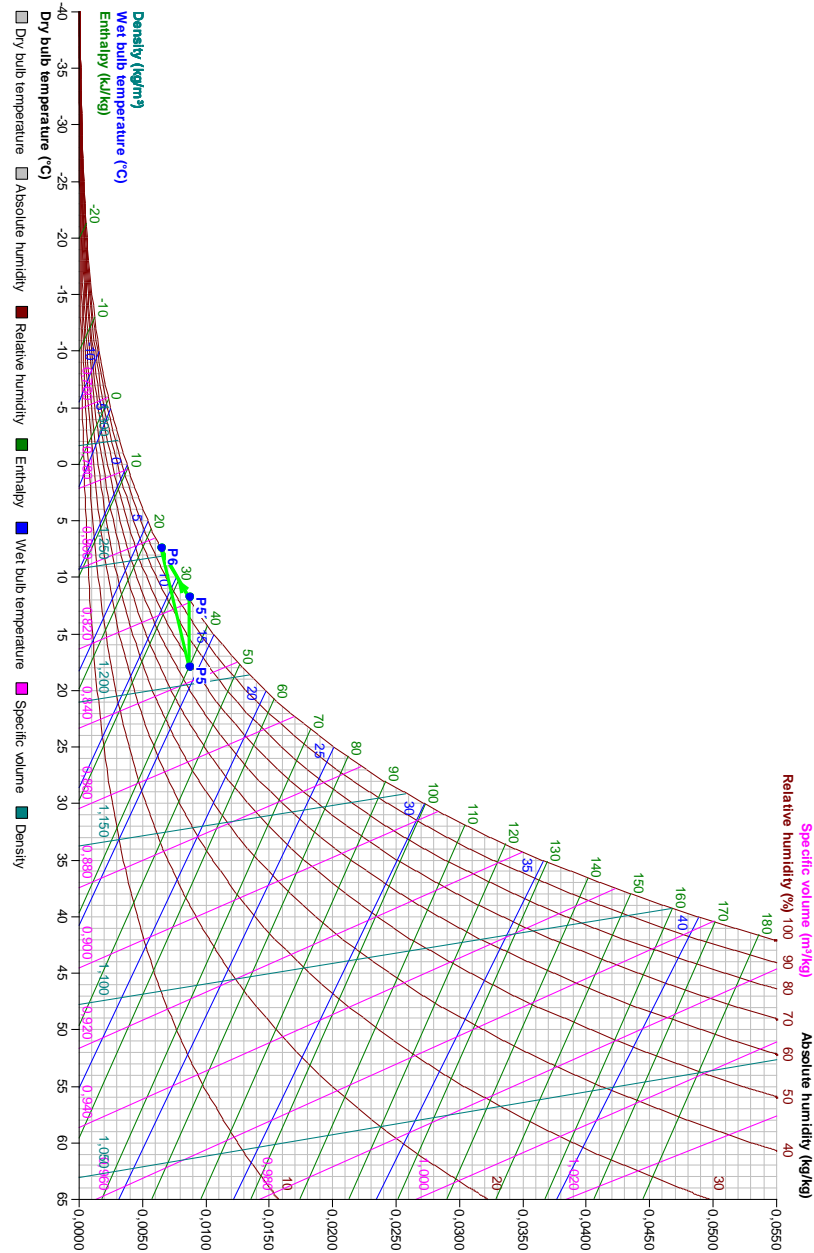


Figura 30: Carta psicrométrica de flujo de aire en el evaporador del ciclo de compresión

9.2. ANEXO B: Diagrama de Mollier del refrigerante R134a

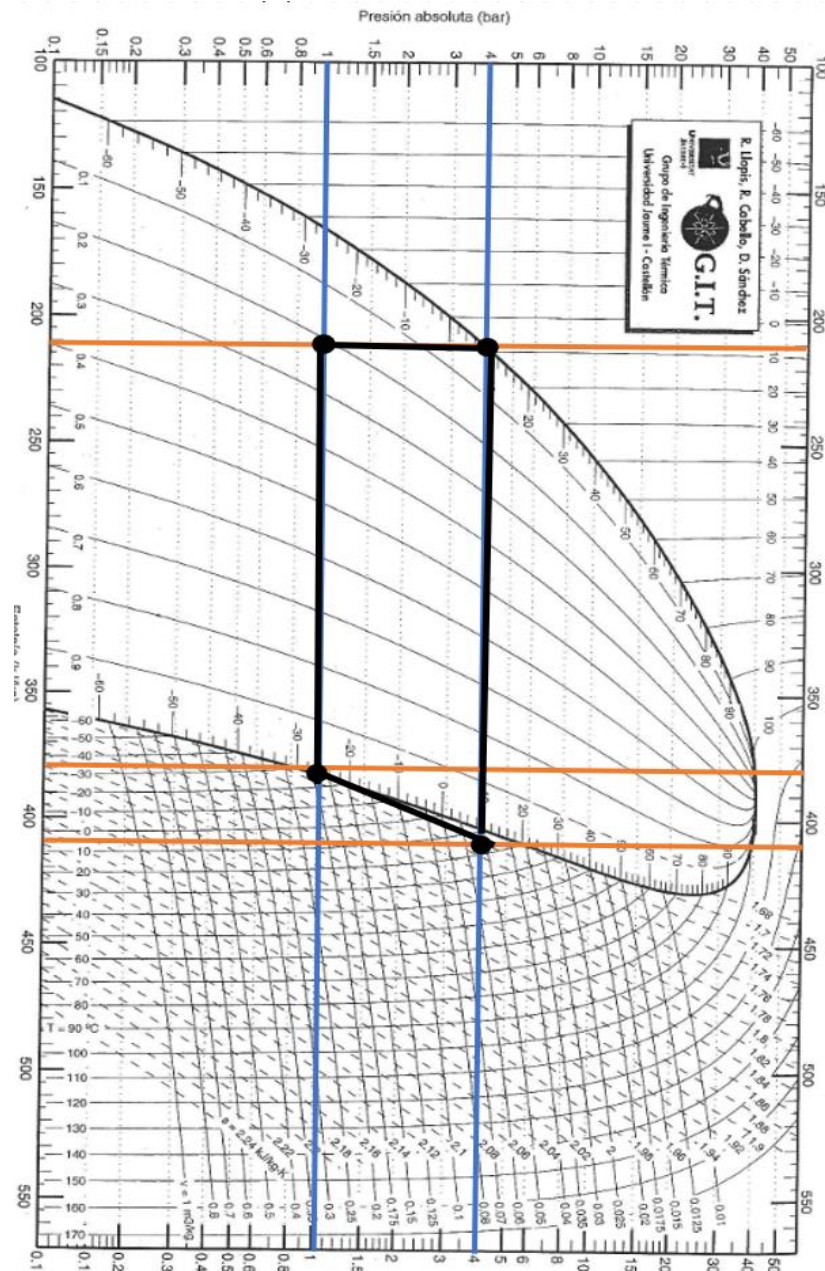


Figura 31: Diagrama de Mollier de refrigerante R134a indicando cada etapa del proceso

9.3. ANEXO C: Parámetros costos de equipos

Equipment	Size unit, S	Size range	Constant		Index n	Comment
			C,£	C,\$		
Agitators						
Propeller	driver	5-75	1200	1900	0.5	
Turbine	power, kW		1800	3000	0.5	
Boilers						
Packaged						oil or gas fired
up to 10 bar	kg/h steam	$(5-50) \times 10^3$	70	120	0.8	
10 to 60 bar			60	100	0.8	
Centrifuges						
Horizontal basket	dia., m	0.5-1.0	35,000	58,000	1.3	carbon steel
Vertical basket			35,000	58,000	1.0	$\times 1.7$ for ss
Compressors						
Centrifugal	driver	20-500	1160	1920	0.8	electric, max. press. 50 bar
Reciprocating	power, kW		1600	2700	0.8	
Conveyors						
Belt	length, m	2-40				
0.5 m wide			1200	1900	0.75	
1.0 m wide			1800	2900	0.75	
Crushers						
Cone	t/h	20-200	2300	3800	0.85	
Pulverisers	kg/h		2000	3400	0.35	
Dryers						
Rotary	area, m ²	5-30	21,000	35,000	0.45	direct
Pan		2-10	4700	7700	0.35	gas fired
Evaporators						
Vertical tube	area, m ²	10-100	12,000	20,000	0.53	carbon steel
Falling film			6500	10,000	0.52	
Filters						
Plate and frame	area, m ²	5-50	5400	8800	0.6	cast iron
Vacuum drum		1-10	21,000	34,000	0.6	carbon steel
Furnaces						
Process						
Cylindrical	heat abs. kW	10^3-10^4	330	540	0.77	carbon steel
Box		10^3-10^5	340	560	0.77	$\times 2.0$ ss
Reactors						
Jacketed, agitated	capacity, m ³	3-30	9300	15,000	0.40	carbon steel
			18,500	31,000	0.45	glass lined
Tanks						
Process	capacity, m ³					
vertical		1-50	1450	2400	0.6	atmos. press.
horizontal		10-100	1750	2900	0.6	carbon steel
Storage						
floating roof		50-8000	2500	4350	0.55	$\times 2$ for
cone roof		50-8000	1400	2300	0.55	stainless

Figura 32: Costo y parámetros de equipos industriales (Max S.Peters, 2003)

9.4. ANEXO D: Flujo de caja escenario 1

	0	1	2	3
Ingresos Afectos a Impuestos		\$ 54.825	\$ 58.004	\$ 61.371
Membresía tecnología		\$ 51.106	\$ 54.172	\$ 57.422
Uso de agua		\$ 3.719	\$ 3.832	\$ 3.949
Costos fijos		\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177
Mantenimiento correctivo		\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
Mantenimiento preventivo		\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
Costos variables		\$ 13.991	\$ 14.417	\$ 14.855
Electricidad		\$ 8.208	\$ 8.458	\$ 8.715
Refrigerante		\$ 5.783	\$ 5.959	\$ 6.140
Egresos Afectos a Impuestos		\$ 18.168	\$ 18.593	\$ 19.032
Utilidad operacional		\$ 36.657	\$ 39.411	\$ 42.339
Depreciación		\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
Pérdida del ejercicio anterior				
Utilidad antes de impuestos		\$ 26.282	\$ 29.036	\$ 31.965
Impuesto (27%)		\$ 7.096	\$ 7.840	\$ 8.630
Utilidad después de impuestos		\$ 19.186	\$ 21.196	\$ 23.334
Depreciación		\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
Inversión capital de trabajo	\$ 14.196			
Inversión	\$ 141.960	\$ 141.960		
Flujo de caja neto	\$ -156.156	\$ -112.399	\$ 31.571	\$ 33.709
Flujo acumulado	\$ -156.156	\$ -268.555	\$ -236.984	\$ -203.275

Figura 33: Flujo de caja sin financiamiento parte 1

4	5	6	7	8	9	10
\$ 64.936	\$ 68.712	\$ 72.711	\$ 76.945	\$ 81.430	\$ 86.180	\$ 91.211
\$ 60.868	\$ 64.520	\$ 68.391	\$ 72.494	\$ 76.844	\$ 81.454	\$ 86.342
\$ 4.069	\$ 4.192	\$ 4.320	\$ 4.451	\$ 4.587	\$ 4.726	\$ 4.870
\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177
\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
\$ 15.307	\$ 15.772	\$ 16.251	\$ 16.745	\$ 17.255	\$ 17.779	\$ 18.320
\$ 8.980	\$ 9.253	\$ 9.534	\$ 9.824	\$ 10.122	\$ 10.430	\$ 10.747
\$ 6.327	\$ 6.519	\$ 6.718	\$ 6.922	\$ 7.132	\$ 7.349	\$ 7.572
\$ 19.483	\$ 19.948	\$ 20.428	\$ 20.922	\$ 21.431	\$ 21.956	\$ 22.496
\$ 45.453	\$ 48.764	\$ 52.283	\$ 56.023	\$ 59.999	\$ 64.225	\$ 68.715
\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
\$ 35.079	\$ 38.389	\$ 41.908	\$ 45.649	\$ 49.625	\$ 53.850	\$ 58.341
\$ 9.471	\$ 10.365	\$ 11.315	\$ 12.325	\$ 13.399	\$ 14.540	\$ 15.752
\$ 25.607	\$ 28.024	\$ 30.593	\$ 33.324	\$ 36.226	\$ 39.311	\$ 42.589
\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
\$ 35.982	\$ 38.399	\$ 40.968	\$ 43.698	\$ 46.601	\$ 49.685	\$ 52.963
\$ -167.293	\$ -128.895	\$ -87.927	\$ -44.229	\$ 2.372	\$ 52.057	\$ 105.021

Figura 34: Flujo de caja sin financiamiento parte 2

9.5. ANEXO E: Flujo de caja escenario 2

	0	1	2	3
Ingresos Afectos a Impuestos		\$ 54.825	\$ 58.004	\$ 61.371
Membresía tecnología		\$ 51.106	\$ 54.172	\$ 57.422
Uso de agua		\$ 3.719	\$ 3.832	\$ 3.949
Costos fijos		\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177
Mantenimiento correctivo		\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
Mantenimiento preventivo		\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
Costos variables		\$ 13.991	\$ 14.241	\$ 14.498
Electricidad		\$ 8.208	\$ 8.458	\$ 8.715
Refrigerante		\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783
Egresos Afectos a Impuestos		\$ 18.168	\$ 18.417	\$ 18.675
Utilidad operacional		\$ 36.657	\$ 39.587	\$ 42.696
Depreciación		\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
Pérdida del ejercicio anterior				
Utilidad antes de impuestos		\$ 26.282	\$ 29.212	\$ 32.322
Impuesto (27%)		\$ 7.096	\$ 7.887	\$ 8.727
Utilidad después de impuestos		\$ 19.186	\$ 21.325	\$ 23.595
Depreciación		\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
Credito	\$ 85.176			
Amortización crédito LP		\$ 5.033	\$ 5.599	\$ 6.229
Inversión capital de trabajo	\$ 14.196			
Inversión	\$ 141.960	\$ 141.960		
Flujo de caja neto	\$ -70.980	\$ 24.528	\$ 26.101	\$ 27.741
Flujo acumulado	\$ -70.980	\$ -46.452	\$ -20.351	\$ 7.389

Figura 35: Flujo de caja con financiamiento LP parte 1

4	5	6	7	8	9	10
\$ 64.936	\$ 68.712	\$ 72.711	\$ 76.945	\$ 81.430	\$ 86.180	\$ 91.211
\$ 60.868	\$ 64.520	\$ 68.391	\$ 72.494	\$ 76.844	\$ 81.454	\$ 86.342
\$ 4.069	\$ 4.192	\$ 4.320	\$ 4.451	\$ 4.587	\$ 4.726	\$ 4.870
\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177
\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
\$ 14.763	\$ 15.036	\$ 15.317	\$ 15.607	\$ 15.906	\$ 16.213	\$ 16.530
\$ 8.980	\$ 9.253	\$ 9.534	\$ 9.824	\$ 10.122	\$ 10.430	\$ 10.747
\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783
\$ 18.940	\$ 19.212	\$ 19.494	\$ 19.784	\$ 20.082	\$ 20.390	\$ 20.707
\$ 45.997	\$ 49.500	\$ 53.217	\$ 57.162	\$ 61.348	\$ 65.791	\$ 70.504
\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
\$ 35.622	\$ 39.125	\$ 42.842	\$ 46.787	\$ 50.974	\$ 55.416	\$ 60.130
\$ 9.618	\$ 10.564	\$ 11.567	\$ 12.633	\$ 13.763	\$ 14.962	\$ 16.235
\$ 26.004	\$ 28.561	\$ 31.275	\$ 34.155	\$ 37.211	\$ 40.454	\$ 43.895
\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
\$ 6.929	\$ 7.709	\$ 8.576	\$ 9.541	\$ 10.614	\$ 11.809	\$ 13.137
\$ 29.449	\$ 31.227	\$ 33.073	\$ 34.988	\$ 36.971	\$ 39.020	\$ 41.132
\$ 36.839	\$ 68.066	\$ 101.139	\$ 136.127	\$ 173.098	\$ 212.118	\$ 253.250

Figura 36: Flujo de caja con financiamiento LP parte 2

9.6. ANEXO F: Flujo de caja escenario 3

	0	1	2	3
Ingresos Afectos a Impuestos		\$ 54.825	\$ 58.004	\$ 61.371
Membresía tecnología		\$ 51.106	\$ 54.172	\$ 57.422
Uso de agua		\$ 3.719	\$ 3.832	\$ 3.949
Costos fijos		\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177
Mantenimiento correctivo		\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
Mantenimiento preventivo		\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
Costos variables		\$ 13.991	\$ 14.241	\$ 14.498
Electricidad		\$ 8.208	\$ 8.458	\$ 8.715
Refrigerante		\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783
Egresos Afectos a Impuestos		\$ 18.168	\$ 18.417	\$ 18.675
Utilidad operacional		\$ 36.657	\$ 39.587	\$ 42.696
Depreciación		\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
Pérdida del ejercicio anterior				
Utilidad antes de impuestos		\$ 26.282	\$ 29.212	\$ 32.322
Impuesto (27%)		\$ 7.096	\$ 7.887	\$ 8.727
Utilidad después de impuestos		\$ 19.186	\$ 21.325	\$ 23.595
Depreciación		\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
Credito	\$ 85.176			
Amortización crédito CP		\$ 13.609	\$ 15.140	\$ 16.843
Inversión capital de trabajo	\$ 14.196			
Inversión	\$ 141.960	\$ 141.960		
Flujo de caja neto	\$ -70.980	\$ 15.952	\$ 16.560	\$ 17.126
Flujo acumulado	\$ -70.980	\$ -55.028	\$ -38.469	\$ -21.342

Figura 37: Flujo de caja con financiamiento CP parte 1

4	5	6	7	8	9	10
\$ 64.936	\$ 68.712	\$ 72.711	\$ 76.945	\$ 81.430	\$ 86.180	\$ 91.211
\$ 60.868	\$ 64.520	\$ 68.391	\$ 72.494	\$ 76.844	\$ 81.454	\$ 86.342
\$ 4.069	\$ 4.192	\$ 4.320	\$ 4.451	\$ 4.587	\$ 4.726	\$ 4.870
\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177	\$ 4.177
\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088	\$ 2.088
\$ 14.763	\$ 15.036	\$ 15.317	\$ 15.607	\$ 15.906	\$ 16.213	\$ 16.530
\$ 8.980	\$ 9.253	\$ 9.534	\$ 9.824	\$ 10.122	\$ 10.430	\$ 10.747
\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783	\$ 5.783
\$ 18.940	\$ 19.212	\$ 19.494	\$ 19.784	\$ 20.082	\$ 20.390	\$ 20.707
\$ 45.997	\$ 49.500	\$ 53.217	\$ 57.162	\$ 61.348	\$ 65.791	\$ 70.504
\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
\$ 35.622	\$ 39.125	\$ 42.842	\$ 46.787	\$ 50.974	\$ 55.416	\$ 60.130
\$ 9.618	\$ 10.564	\$ 11.567	\$ 12.633	\$ 13.763	\$ 14.962	\$ 16.235
\$ 26.004	\$ 28.561	\$ 31.275	\$ 34.155	\$ 37.211	\$ 40.454	\$ 43.895
\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375	\$ 10.375
\$ 18.738	\$ 20.846	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$ 17.641	\$ 18.090	\$ 41.649	\$ 44.529	\$ 47.585	\$ 50.828	\$ 54.269
\$ -3.702	\$ 14.388	\$ 56.038	\$ 100.567	\$ 148.152	\$ 198.981	\$ 253.250

Figura 38: Flujo de caja con financiamiento CP parte 2