

## CARACTERIZACION EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE CAPTACION DE AGUA ATMOSFERICA

Emir Castillo Olave<sup>2</sup>, Andrés Escalona Inzunza<sup>2</sup>, Cristian Cuevas Barraza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile. Email: emcastillo2019@udec.cl

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile. Email: andrescalona@udec.cl

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile. Email: crcuevas@udec.cl

### Resumen

Chile enfrenta desafíos significativos debido a su variabilidad geográfica y climática, lo que complica la gestión de los recursos hídricos en muchas zonas del país. Una forma de mitigar la entrega del recurso hídrico para consumo humano principalmente en zonas rurales es el uso de sistemas de captación de agua atmosférica. El presente artículo tiene como objetivo mostrar una metodología para la caracterización experimental de un sistema comercial de captación de agua atmosférica en un entorno controlado, evaluando su viabilidad para diferentes zonas climáticas. El texto subraya la importancia de establecer objetivos claros y describe la instalación de instrumentos de medición, la verificación de su funcionamiento y la recolección de datos durante los ensayos.

Se presentan resultados de la caracterización del equipo utilizado, considerando aspectos físicos como el intercambio de calor en el evaporador y los principios de conservación de masa además de aportar con conclusiones en torno a las condiciones más favorables para operar estos equipos.

**Palabras clave:** sistema de captación de agua atmosférica, bomba de calor, caracterización experimental

### Abstract

Chile faces significant challenges due to its geographic and climatic variability, complicating the management of water resources in many areas of the country. One way to mitigate the delivery of water resources for human consumption, especially in rural areas, is through the use of atmospheric water capture systems. This article aims to present a methodology for the of a commercial atmospheric water capture system in a controlled environment, evaluating its feasibility across different climatic zones. The text emphasizes the importance of setting clear objectives and describes the installation of measurement instruments, verification of their operation, and data collection during trials.

Results from the characterization of the equipment are presented, considering physical aspects such as heat exchange in the evaporator and principles of mass conservation, while also providing conclusions regarding the most favorable conditions for operating these systems.

**Keywords:** Atmospheric Water Harvesting, heat pump, experimental characterization

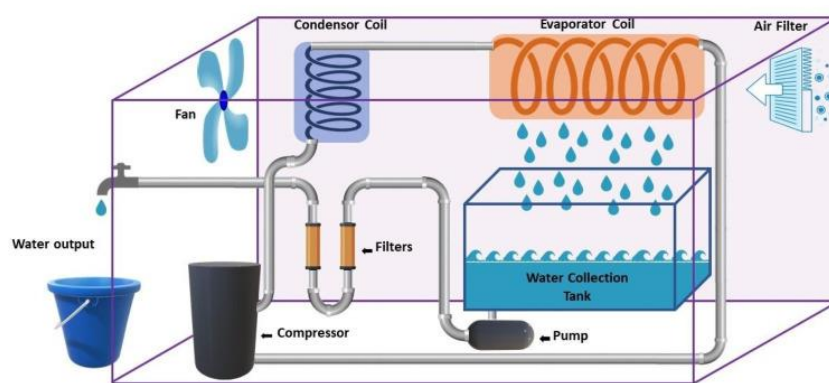
### 1. Introducción

El cambio climático es un fenómeno complejo y multifacético que tiene amplias implicaciones para el planeta y la humanidad. Además, tiene una serie de impactos significativos en el medio ambiente, la economía y la sociedad en general. A medida que la temperatura aumenta, también aumenta la cantidad de energía en la superficie de la tierra, lo que provoca una intensificación del ciclo global del agua [1]. Los

patrones de lluvia, la evapotranspiración, el contenido de agua troposférica y la escorrentía están cambiando, lo que afecta la disponibilidad de agua [2]. En el año 2016 se estimaba una demanda mundial de agua en alrededor de  $4.600 \text{ km}^3/\text{año}$  y se prevé que aumente entre un 20% y un 30% (de  $5.500$  a  $6.000 \text{ km}^3/\text{año}$ ) para 2050, para el cual entre los años 2017 y 2050 se espera que aumente de 7.700 millones de habitantes a entre 9.400 y 10.200 millones, siendo el sector agrícola el mayor consumidor de agua en el mundo

[3]. Chile dado a su gran variabilidad geográfica y climática plantea una serie de desafíos para la gestión de los recursos hídricos, la disponibilidad de agua en cantidad y calidad adecuada varía mucho según zonas geográficas.

Una de las opciones de producción de agua fresca para consumo humano son los sistemas de captación de agua atmosférica los cuales funcionan con energía eléctrica gobernados por los principios termodinámicos del ciclo de refrigeración. En la figura 1 se muestra un esquema que explica como opera un sistema de captación de agua atmosférica [4].



**Figura 1.** Esquema de un sistema de captación de agua atmosférica usando sistema de refrigeración por compresión de vapor. Fuente: Ahrestani et al. (2023) [4]

El sistema comercial que se evaluará como caso estudio, es un dispensador de agua purificada del aire modelo “URBAN” de la empresa Water Quality (figura 2) [5]. Este modelo puede llegar a generar hasta 15 litros por día (en condiciones nominales de un 80% HR y a una temperatura de 30°C) sin embargo, las condiciones ambientales varían hora a hora por lo que la caracterización implicará determinar el perfil de funcionamiento en un rango más amplio de operación que muchas veces los fabricantes no entregan.



**Figura 2.** Dispensador de agua purificada del aire modelo “Urban”[5]

## 1.2 Objetivos

El objetivo general de la investigación es proponer una metodología para caracterizar equipos comerciales de captación de agua atmosférica. La finalidad de la caracterización es evaluar la implementación en lugares con escases hídrica en Chile.

Los objetivos específicos son:

- Diseñar metodología experimental para caracterizar el equipo comercial.
- Caracterizar experimentalmente el sistema de captación de agua atmosférica.

- Evaluar y analizar los resultados experimentales obtenidos de la caracterización experimental.

## 1.3 Hipótesis

Los sistemas de captación de agua atmosférica basados en refrigeración por compresión de vapor se presentan como una alternativa para combatir la escases hídrica que permite una generación de agua fresca todo el año generando un impacto ambiental mínimo en comparación a otros sistemas como los sistemas de desalinización.

## 2. Metodología

La metodología experimental para caracterizar el equipo se va a subdividir la selección de equipos e instrumentación, instalación de la instrumentación, planificación y realización de ensayos, análisis de resultados identificando parámetros de desempeño. En la figura 3 se muestra la ubicación de la entrada y salida del aire en el equipo en la cual se instalarán sensores para medir condiciones psicrométricas del aire. Las mediciones se toman considerando lo recomendado por la norma ISO 5725-1 [6].



**Figura 3.** a) Sección por donde ingresa el aire al equipo (b) Sección de salida del aire en el equipo.

## 2.1 Selección de instrumentación

Las mediciones que se llevarán a cabo en los ensayos, se necesitarán los siguientes instrumentos:

### 2.1.1 Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura son usados para medir temperatura en distintos puntos del equipo, principalmente a la entrada y salida del equipo. Dadas a las condiciones de trabajo en que se operaran los ensayos el sensor de temperatura adecuado sería usar termopares tipo T clase 1 las cuales presentan una tolerancia de  $\pm 0,5\%$  en un rango temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$  [6].

### 2.1.2 Sensor de fuerza

El sensor de fuerza o “celda de carga” se usará para medir la producción de agua del equipo. Estos sensores producen una señal eléctrica proporcional a la fuerza aplicada. El sensor que se consideró es un “Tedeo-Huntleigh model 1040” con una capacidad de hasta 100 kg.

### 2.1.3 Sensor de presión atmosférica

Este sensor es esencial para conocer a que presión atmosférica se encuentra funcionando el equipo, para así conocer la densidad del aire con el cual está trabajando, esto es relevante considerando que el aire cambia sus propiedades psicrométricas al ubicar el equipo en una zona que esta por sobre o bajo el nivel del mar. Para la realización de los ensayos se hace utilización de un “Barometric/Temp.Transmitter BRT-220 RIXEN”

### 2.1.4 Sensor de humedad

El sensor para utilizar permite obtener la humedad relativa y temperatura de bulbo seco de forma directa y enviar los datos a un sistema de adquisición de datos. Para la realización de los ensayos se utilizó un

sensor “Humidity/Temperature Transmitter TRH-303”.

### 2.1.5 Medidor de consumo de energía eléctrica

El medidor de consumo de energía eléctrica se usa para registrar la cantidad de energía eléctrica que consume el equipo durante el periodo de funcionamiento. Para la realización de los ensayos se usaron en paralelo un medidor monofásico análogo 220V DRL DD862 y un medidor monofásico RS485-M2DL2 que además de medir consumo eléctrico total, mide potencia activa, reactiva, tensión, intensidad, frecuencia y factor de potencia.

### 2.1.6 Sensor de velocidad

Para medir velocidad del viento se usó un anemómetro “Stick-Type Thermo Anemometer model: 361”. Este es un equipo con el cual se deben hacer mediciones manuales cada cierto periodo de tiempo. Con esta medición además de conocer las dimensiones de la sección de entrada y salida del equipo se puede obtener el flujo volumétrico que circula por el equipo.

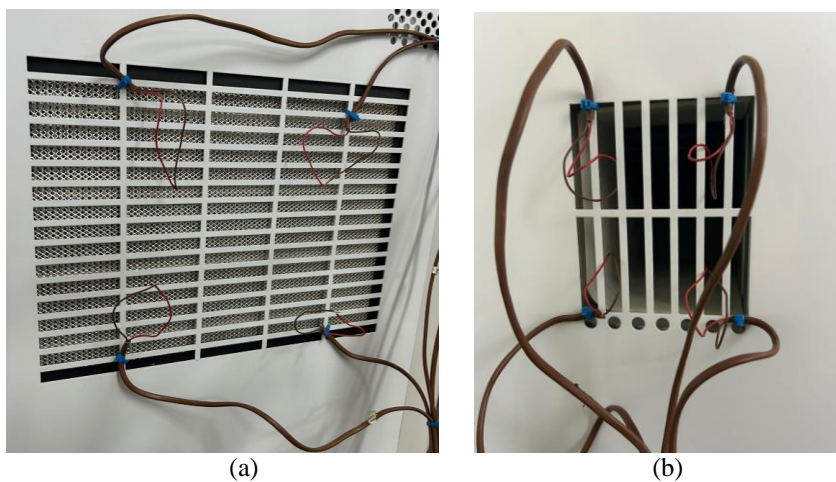
### 2.1.7 Sistema de adquisición de datos

Los equipos previamente mencionados, estarán conectados a una tarjeta de adquisición de datos DAQ. La tarjeta de adquisición de datos usada es del tipo “SI 35951C IMP” la cual convierte una señal analógica proveniente de los sensores en señales digitales las cuales pueden ser procesadas por computadoras. El error para medir temperatura es de un  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  y el error en la medición de tensión en una escala de 0 - 2V es de  $\pm(0,01\% \text{ rdg} + 0,16\% \text{ fs})$ . El software empleado para recopilar, procesar y almacenar los datos medidos es el programa “impviewer 32”.

## 2.2 Instalación de instrumentación

### 2.2.1 Instalación de termocuplas

Para medir temperatura se instalan 10 termopares en total de los cuales 4 se instalan en la entrada del aire en el equipo, otras 4 en la salida de aire del equipo con la finalidad de obtener un perfil de temperatura en cada caso lo cual permite tener una medición más realista de la temperatura promedio, 1 entre el condensador y evaporador y 1 para medir temperatura ambiente. En la figura 4 se muestra la instalación de las termocuplas en la entrada y salida del aire en el equipo.



**Figura 4.** a) Termopares instalados en la entrada de aire del equipo (b) Termopares instalados en la salida de aire del equipo

En la figura 5 se muestra la forma de instalar la termocupla para medición de temperatura ambiente. Este se inserta al interior de un cilindro con papel aluminio para proteger contra corrientes de aire y el efecto de la radiación de las superficies aledañas que podrían provocar una distorsión en la medición.



**Figura 5.** Instalación de termopar para medición de temperatura ambiente.

### 2.2.2 Instalación de sensor de fuerza

El sensor de fuerza se usa para medir la masa de agua que logra captar el equipo en el tiempo. A medida que el equipo capta agua, esta se deposita en un balde el cual se encuentra en voladizo sobre el sensor de fuerza. Cabe destacar que el depósito de agua también posee masa por lo que previo a la medición esta debe calibrarse. En la figura 6 se muestra la instalación del sensor de fuerza.



**Figura 6.** Instalación de sensor de fuerza para medición de masa de agua captada.

### 2.2.3 Instalación de sensor de humedad

El sensor de humedad se instala en la entrada de la toma de aire del equipo con el de medir la humedad

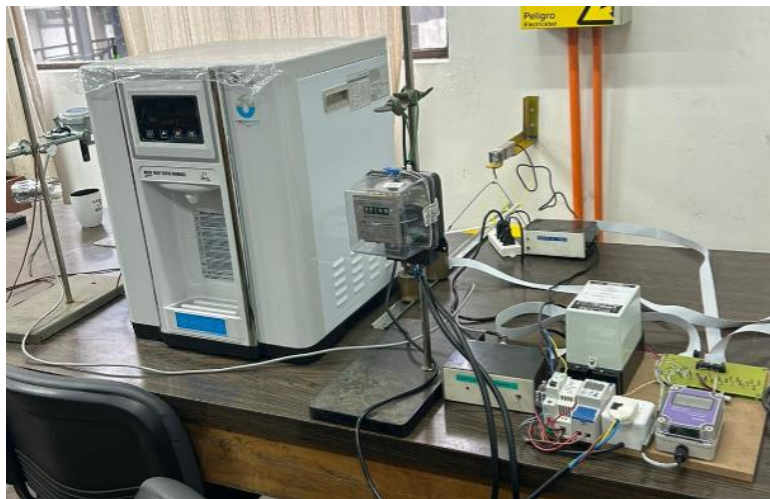


relativa que posee el aire en dicho punto. Este se deja fijo a través de un soporte para dejarlo fijo y en una zona lo suficientemente cercana. En la figura 7 se muestra el equipo montado sobre el soporte.



**Figura 7.** Instalación de sensor de humedad para medición de humedad relativa en la entrada de aire al equipo.

Finalmente, en la figura 8 se muestra la instalación global de la instrumentación y adquisición de datos. Equipos como sensores de presión atmosférica, medidores de consumo de energía y velocidad del aire se toman de forma manual sin usar adquisición de datos.



**Figura 8.** Instalación de sistema de adquisición e instrumentos de medición.

### 2.3 Planificación de ensayos

Los datos que se procesan a través del sistema de adquisición de datos se miden cada 10 segundos. Las mediciones de potencia y consumo eléctrico se miden cada 15 minutos asumiendo que las condiciones psicrométricas del ambiente no presentan variaciones significativas que alteren la medición de estas en un intervalo de tiempo menor. Se realizaron mediciones

diarias durante 2 meses aproximadamente para evaluar el desempeño del equipo.

### 2.4 Tratamiento de datos, gráficos e indicadores de desempeño

Los datos medidos se van a tratar de tal manera que se eliminan errores debido a perturbaciones externas, valores atípicos puntuales o datos que no se midieron. Una vez realizado esto, se procede a graficar las principales variables que permiten caracterizar el equipo y obtener indicadores de desempeño. En general se grafica:

- Temperatura del aire a la salida del evaporador en función del tiempo.
- Temperatura del aire a la salida del equipo (condensador) en función del tiempo.
- Temperatura del aire a justo en la entrada del equipo (entrada en evaporador) en función del tiempo.
- Temperatura y humedad relativa del aire en la entrada del equipo en función del tiempo.
- Cantidad de agua captada v/s cantidad de agua disponible en el aire.

Utilizando las propiedades psicrométricas medidas junto con el principio de conservación de la masa, es

posible determinar la cantidad total de agua que dispone el aire. Conocida la masa de agua que capta el equipo a partir de las mediciones realizadas, la eficacia del equipo se puede calcular mediante la ecuación (1).

$$\varepsilon = \frac{M_{w,prod}}{M_{w,pot,tot}} \quad (1)$$

Donde  $\varepsilon$  es la eficacia del equipo,  $M_{w,prod}$  es la cantidad de agua que capta el equipo la cual fue medido con el sensor de fuerza y  $M_{w,pot,tot}$  corresponde a la masa de agua total que contiene el aire la cual resulta al integrar el flujo másico de aire ( $\dot{M}_a$ ) que circula por el equipo por la diferencia de humedad específica ( $\omega$ ) entre la entrada (1) y salida (2) del equipo. La ecuación (2) muestra la forma de cómo se calcula la masa de agua total disponible en el aire que pasa por el equipo .

$$M_{w,pot} = \int_{t_0}^{t_1} \dot{M}_a * (\omega_1 - \omega_2) dt \quad (2)$$

Otro aspecto importante para caracterizar el equipo es determinar el consumo específico de energía (SEC) con la finalidad de determinar la energía eléctrica que se consume en este caso por litro de agua captado. Como se mide el consumo de energía eléctrica y la masa de agua durante los mismos intervalos de tiempo, el SEC se puede determinar con la ecuación (2) donde E es la energía eléctrica consumida y  $M_{w,prod}$  es la cantidad de agua captada por el equipo [7][8].

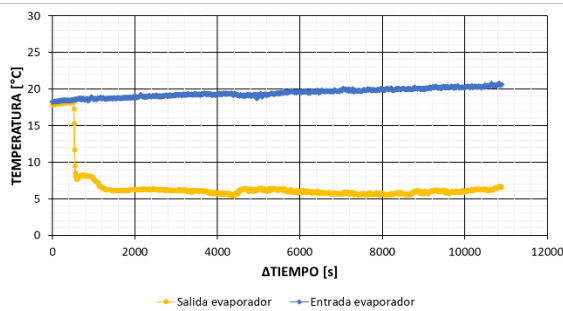
$$SEC = \frac{E}{M_{w,prod}} \quad (3)$$

### 3. Resultados

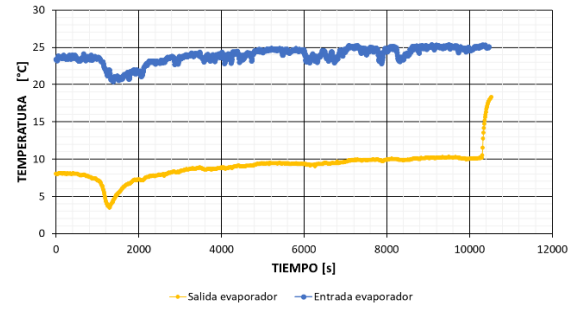
#### 3.1 Gráficos de los ensayos realizados

Las gráficas que se muestran a continuación corresponden a un ensayo realizado el día 16 de abril del año 2024 donde se ensayó el equipo durante la mañana entre 08:39:30 hasta las 11:59:30 hrs. A este primer periodo de tiempo se le denominará “Ensayo A”.

Posteriormente el día 18 de abril del año 2024, se realizó otro ensayo entre 13:26:30 hasta las 16:22:00 hrs. A este periodo de tiempo se le denominará “Ensayo B”. En la figura 9 se muestra la temperatura medida por las termocuplas ubicadas en la entrada y en la termocupla intermedia del equipo para Ensayo A y Ensayo B respectivamente.

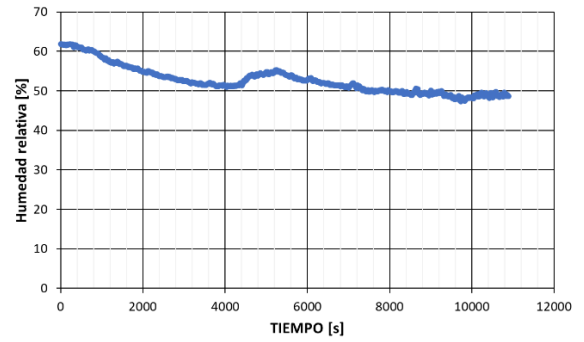


**Figura 9a.** Temperatura del aire en la entrada y salida del evaporador para el ensayo A

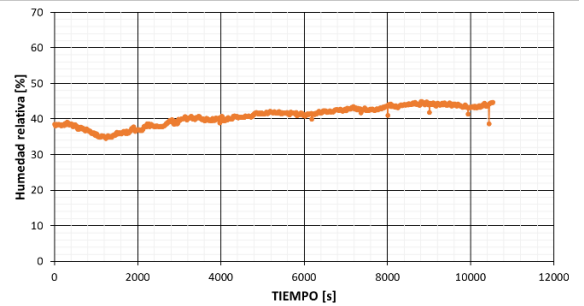


**Figura 9b.** Temperatura del aire en la entrada y salida del evaporador para el ensayo B

En la figura 10a y 10b respectivamente se muestran las mediciones para la humedad relativa ambiental del ensayo A y B respectivamente.

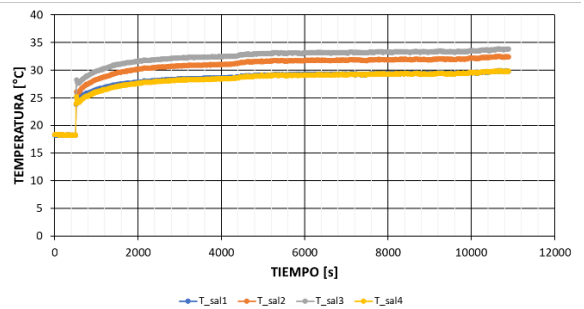


**Figura 10a.** Humedad relativa ambiental del ensayo A

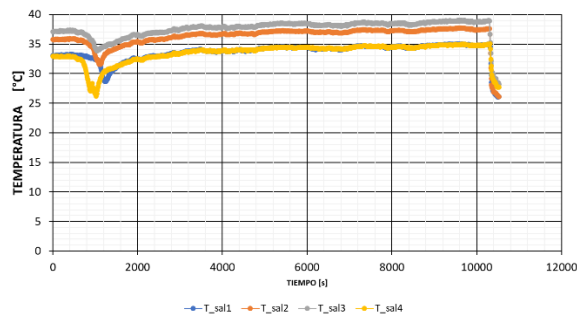


**Figura 10b.** Humedad relativa ambiental del ensayo B

En la figura 11a y 11b se muestran las temperaturas que se miden a la salida del equipo.

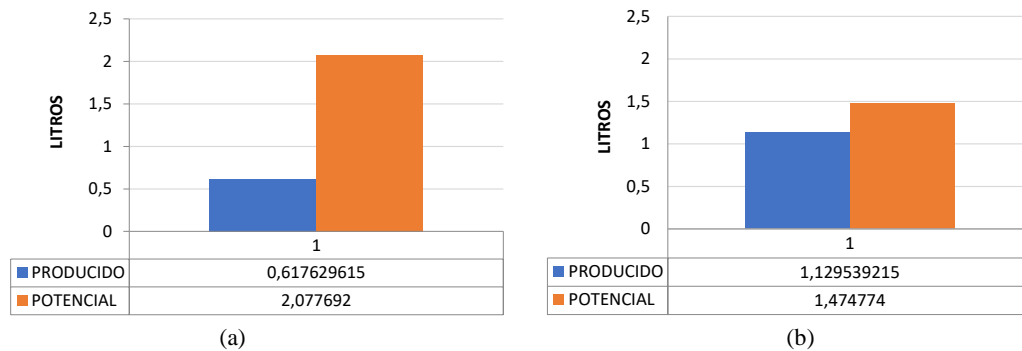


**Figura 11a.** Temperatura a la salida del equipo medido con las termocuplas en el ensayo A

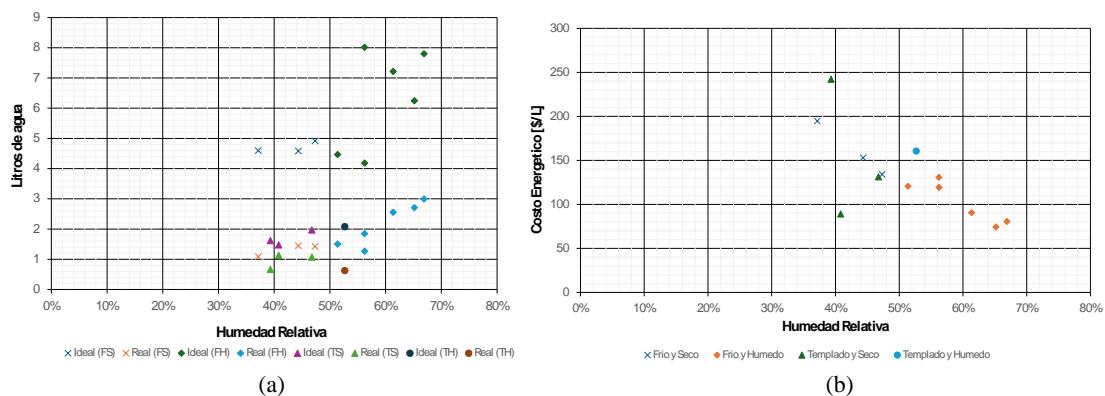


**Figura 11b.** Temperatura a la salida del equipo medido con las termocuplas en el ensayo B

En la figura 12 se muestra el potencial de agua medido v/s el potencial de agua calculado para cada ensayo aplicado.



**Figura 12.** Cantidad de agua producida en litros respecto a la cantidad de agua disponible en el flujo de aire  
a) Ensayo A (b) Ensayo B.



**Figura 13.** Indicadores de eficiencia y consumo energético para diferentes condiciones climáticas  
a) Litros de agua v/s humedad relativa A (b) consumo energético v/s humedad relativa

Al analizar los datos medidos se puede verificar que estos tienen coherencia con el comportamiento del equipo donde el aire se enfría al pasar por evaporador y posteriormente repone calor sensible al pasar por el condensador antes de ser devuelto al ambiente. Se puede visualizar también que las mañanas son más frías y el aire presenta mayor contenido de agua

respecto a la tarde que disminuye el potencial de captación respecto a la tarde.

Sin embargo, se puede verificar sobre todo con la figura 12 que la temperatura incide positivamente sobre la eficiencia del equipo a pesar de tener un menor potencial, esto se explica principalmente por el ciclo de refrigeración ya que si el aire está muy frío la humedad se puede congelar en el equipo, por otro lado, si el aire es muy cálido y la humedad relativa demasiado baja, el evaporador sólo va a enfriar el aire sin llevar el agua contenida a su punto de rocío.

### 3.2 Análisis de resultados e indicadores de desempeño

Adicional a los ensayos A y B se realizaron 11 ensayos posteriores. La finalidad era recopilar una cantidad de datos suficientes para poder establecer un

patrón de comportamiento del equipo agrupando los resultados para climas:

- Climas Fríos y Secos (FS)
- Climas Fríos y Húmedos (FH)
- Climas Templado y Secos (TS)
- Climas Templado y Húmedos (TH)

En la figura 13 se puede ver la diferencia entre el potencial de agua (Ideal) y lo que realmente se recolecta esos días (Real) en promedio. En los climas categorizados como TS no es significativa la diferencia entre el potencial y el agua capturada a comparación de los demás tipos de climas, esto se puede verificar con la eficiencia calculada (tabla 1).

- El costo específico de producción de agua (\$/L) es directamente proporcional a la humedad relativa de la zona, a más humedad relativa, menor será el costo de producción.
- A pesar de lo alta cantidad de agua que pueda contener el aire, sólo se logra captar una pequeña porción, principalmente en

**Tabla 1.** Resumen resultados obtenidos del desempeño del equipo para diferentes tipos de climas

Condición climática	Temperatura [°C]	Humedad Relativa [%]	Agua Producida [L/h]	Potencial de agua [L/h]	Eficiencia	Consumo de Energía [kW/h]	Costo específico de agua [\$/L]
Frio y Seco	$T < 17$	$HR < 50$	0,191	0,678	28,15%	0,296	233,23
Frio y Húmedo	$T < 17$	$HR < 50$	0,318	0,930	34,23%	0,306	144,55
Templado y Seco	$17 \leq T \leq 25$	$HR < 50$	0,263	0,439	59,81%	0,336	192,30
Templado y Húmedo	$17 \leq T \leq 25$	$HR > 50$	0,209	0,693	30,17%	0,333	239,65

Fuente: Elaboración propia.

Se puede ver que este equipo en climas fríos y húmedos capta mayor cantidad de agua y con mejor costo específico de agua producida, sin embargo, para climas templados y secos obtiene una mayor eficiencia respecto al potencial de agua disponible. Estos resultados se explican por las limitaciones del ciclo de refrigeración [9] [10].

Se puede ver, además, que el costo por litro de agua es, en cualquier caso, mas bajo que el agua embotellada que se vende en el comercio, considerando que el agua que se suministra en zonas de escasas hídrica muchas veces no es apta para ingerirla por su alto contenido de metales pesados.

### 3.1. Conclusiones

- La metodología de ensayo propuesta es una buena alternativa para caracterizar equipos por la facilidad de implementar.
- El fabricante especifica que para 80% HR y 30°C puede generar hasta 15 L/hr lo cual no fue posible ensayar ya que en Chile en ninguna estación del año se da esa condición de clima.
- Se logró caracterizar el equipo logrando identificar los patrones de funcionamiento en climas típicos de Chile donde el equipo opera mejor en cuanto a eficiencia en climas templados secos, sin embargo, en climas fríos y húmedos este logra captar la mayor cantidad de agua.

climas fríos, esto se debe a las limitaciones que presenta el ciclo de refrigeración, especialmente a temperaturas bajas (inferior a 6°C) donde se puede producir congelamiento en el evaporador (frosting).

### 4. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por ANID FONDEF ID22110051.

### 5. Referencias

- [1] C. P. Khedun and V. P. Singh, "Climate Change, Water, and Health: A Review of Regional Challenges," *Water Qual Expo Health*, vol. 6, no. 1–2, pp. 7–17, Jun. 2014, doi: 10.1007/s12403-013-0107-1.
- [2] C. P. Khedun and V. P. Singh, "Climate Change, Water, and Health: A Review of Regional Challenges," *Water Qual Expo Health*, vol. 6, no. 1–2, pp. 7–17, Jun. 2014, doi: 10.1007/s12403-013-0107-1.
- [3] UNESCO, "Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018: soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua, cifras y datos," 2018. Accessed: Jul. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/es/reports>
- [4] Z. Ahrestani, S. Sadeghzadeh, and H. B. Motejadded Emrooz, "An overview of atmospheric water harvesting methods, the inevitable path of the future in water supply,"



- RSC Adv, vol. 13, no. 15, pp. 10273–10307, 2023, doi: 10.1039/D2RA07733G.
- [5] “Equipo captador de agua atmosférico «FreshWater,»” 2024. [Online]. Available: <https://freshwatersolutions.org/urban/>
- [6] Norma ISO 5725-1, “Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results Part 1 General principles and definitions. ,” 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/94/69418.html?browse=tc>
- [7] R. M. Swanson, “The minimum work requirements for atmospheric water harvesting,” *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e17062, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17062.
- [8] B. Tashtoush and A. Alshoubaki, “Atmospheric water harvesting: A review of techniques, performance, renewable energy solutions, and feasibility,” *Energy*, vol. 280, p. 128186, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128186.
- [9] F. Bagheri, “Performance investigation of atmospheric water harvesting systems,” *Water Resour Ind*, vol. 20, pp. 23–28, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.wri.2018.08.001.
- [10] D. Kumar, A. Tiwari, V. Agarwal, and K. Srivastava, “Investigation of atmospheric water vapour condensation and characteristic analysis as potable water,” *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 4905–4918, May 2023, doi: 10.1007/s13762-022-04199-4.