



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# **UNIVERSIDAD DE SONORA**

---

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UN  
DESALINIZADOR POR ASPERSIÓN USANDO  
ENERGÍA SOLAR**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**YESICA RAQUEL QUIJADA NORIEGA**

**DIRECTOR: RAFAEL ENRIQUE CABANILLAS LÓPEZ**

**Hermosillo, Sonora**

**Agosto, 2020**

# Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

---

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## APROBACIÓN DEL JURADO

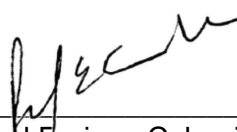
de la tesis presentada por:

**Yesica Raquel Quijada Noriega**

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

14/08/2020

Fecha



Dr. Rafael Enrique Cabanillas López  
Presidente

14/08/2020

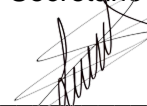
Fecha



Dr. Armando Piña Ortiz  
Secretario

14/08/2020

Fecha



Dr. Jesús Armando Lucero Acuña  
Sinodal

14/08/2020

Fecha



Dr. Germán Eduardo Dévora Isiordia  
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

## AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

17 de Agosto de 2020.

Por medio de la presente se hace constar que la estudiante **YESCIA RAQUEL QUIJADA NORIEGA**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

*Abraham Rogelio Martín García*  
DR. ABRAHAM ROGELIO MARTIN GARCÍA

COORDINADOR POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:  
INGENIERÍA QUÍMICA

---

## RESUMEN

El agua es una de las necesidades fundamentales para la vida en la Tierra. Sin embargo, el calentamiento global, la contaminación del agua y el crecimiento de la población humana han generado una escasez de agua potable. Entre todas las tecnologías utilizadas para obtener agua potable, destaca la desalinización. La desalinización se distingue por utilizar como materia prima: agua que contiene concentración de sal. Dicho proceso tiene dos características que son importantes mejorar: consume una alta cantidad de energía y produce un desecho que tiene efectos negativos al ambiente. Las plantas de desalinización de ósmosis inversa obtienen agua dulce como producto, y salmuera como desecho. Usualmente, la salmuera se descarga al mar, lo cual, puede afectar la vida marina de alrededor. El término salmuera es usado para salinidades superiores a 50 g/L. El uso de estas plantas de ósmosis inversa continuará creciendo en todo el mundo, por lo que es necesario tener un control y manejo adecuado de la salmuera. El secado por aspersion consiste en la transformación de un fluido concentrado a partículas secas, con el contacto de un medio gaseoso caliente. En este trabajo, se realiza un estudio macroscópico del proceso de secado por aspersion que es alimentado por la salmuera (rechazo) de las plantas de ósmosis inversa, para así obtener sal y agua condensada. Además, se desarrolla un simulador matemático que permite conocer el comportamiento de parámetros del proceso bajo diferentes condiciones de operación, variando la temperatura de la salmuera y del aire atmosférico, la concentración de la salmuera y la humedad relativa del aire. Asimismo, se establecen relaciones de algunos parámetros importantes con respecto a un litro de salmuera que entra al proceso de desalinización. El proceso garantiza el impacto cero en la flora y fauna marina, así como el uso de energías renovables, utilizando sistemas solares térmicos para el calentamiento de la salmuera y el aire atmosférico.

---

## ABSTRACT

Water is one of the fundamental needs for life on Earth. However, global warming, water contamination and growth of the human population have generated a shortage of drinking water. Among all the technologies used to obtain drinking water, desalination stands out. Desalination is distinguished by using water that contains a concentration of salt like raw material. Said process has two characteristics that are important to improve: it consumes a large amount of energy and it produces a waste that has negative effects on the environment. Reverse osmosis desalination plants, obtain potable water as product, and brine as waste. Usually, brine can have an effect on marine life when discharged to seawater. The use of this plants, will continue to grow around the world, that is why it is necessary to have an appropriate control and management of brine. Spray drying consists on the transformation of a concentrated fluid into dried particles, this transformation is through contact with a hot gas. In this work, a macroscopic study of the spray drying process to use brine from reverse osmosis plants is performed, to obtain solid salt and potable water. In addition, a mathematical simulator that allows knowing the behavior of process parameters under certain operating conditions, is developed, varying conditions as temperature of brine and atmospheric air, concentration of brine, and relative humidity of air. Additionally, relationships of some important parameters with respect to a liter of brine that enters on this desalination process are established. The study is intended to improve and to be environmentally friendly, so we can ensure a zero impact in flora and fauna of the marine environment, as well as the use of renewable energy, using thermal solar systems to heat the brine and atmospheric air.

---

## DEDICATORIA

A Dios por su gracia e infinito favor. Todo se lo debo a Él.

“Y aunque tu principio haya sido pequeño, Tu postrer estado será muy grande” Job 8:7

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas” Josué 1:9

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	IV
ABSTRACT .....	V
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABLAS .....	XIV
NOMENCLATURA .....	XVI
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
Introducción.....	1
Justificación .....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos .....	4
Metodología general .....	4
CAPÍTULO 2.....	6
ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	6
2.1. Procesos de Desalinización.....	6
2.2. Métodos de disposición de Salmuera.....	8



2.2.1.	Normatividad .....	10
2.2.2.	Efectos de la descarga de la salmuera al mar .....	10
2.2.3.	Cero descarga de líquidos .....	12
2.2.4.	Secado por aspersión .....	13
<b>CAPÍTULO 3.....</b>		<b>15</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>		<b>15</b>
<b>3.1. Formulación del Simulador Matemático .....</b>		<b>15</b>
<b>3.2. Descripción del proceso .....</b>		<b>15</b>
2.2.5.	Etapa 1: Calentamiento de la salmuera .....	17
2.2.6.	Etapa 2: Calentamiento del aire.....	18
2.2.7.	Etapa 3: Obtención de la sal.....	21
2.2.8.	Etapa 4: Condiciones de aire y vapor de agua a la salida del secador por aspersión .....	21
2.2.9.	Etapa 5: Obtención del agua condensada.....	24
2.2.10.	Etapa 6: Obtención del flujo de entrada del refrigerante en el condensador .....	26
2.2.11.	Etapa 7: Obtención de la temperatura de salida del refrigerante en el condensador .....	29
<b>2.3. Suposiciones .....</b>		<b>30</b>
<b>2.4. Balance de masa por componente.....</b>		<b>30</b>
<b>3.5. Comportamiento de la temperatura en cada una de las etapas del proceso de desalinización.....</b>		<b>31</b>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>32</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>32</b>
<b>4.1. Caso 1. Variación de la temperatura del aire a la entrada del secador .....</b>		<b>32</b>

---

---

4.2. Caso 2. Variación de la temperatura de la salmuera a la entrada del secador.....	40
4.3. Caso 3. Variación del porcentaje de la humedad relativa del aire atmosférico .....	44
4.4. Caso 4. Variación de la concentración de la salmuera en la entrada del secador por aspersión .....	48
4.5. Caso 5. Estudio utilizando las condiciones de dos días tomados del mes típico del Año Típico Meteorológico (TMY).....	52
4.6. Simulador termodinámico desarrollado .....	59
4.7. Suministro de calor con energía solar.....	62
4.8. Comparación del agua obtenida en el simulador desarrollado, con respecto a destiladores solares existentes.....	62
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>64</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>71</b>
Anexo A: Tabla límites máximos permisibles para los vertidos de la salmuera de las plantas desalinizadoras.....	71
Anexo B. Carta psicrométrica.....	72
Anexo C: Diagrama que muestra la ubicación de los parámetros de la carta psicrométrica .....	73
Anexo D: Calor específico de la salmuera en función de la salinidad y la temperatura, J/kg K.....	74

---

---

<b>Anexo E: Densidad de la salmuera en función de la salinidad y la temperatura, kg/m<sup>3</sup> ....</b>	<b>76</b>
<b>Anexo F: Calor latente de vaporización de la salmuera en función de la salinidad y la temperatura, kJ/kg .....</b>	<b>78</b>
<b>Anexo G: Presión de vapor saturado de la salmuera en función de la salinidad y la temperatura, kPa .....</b>	<b>80</b>
<b>Anexo H: Presión de vapor saturado del agua sin NaCl en función de la temperatura, kPa .....</b>	<b>82</b>
<b>Anexo I: Entalpía del vapor saturado a diferentes temperaturas, kcal/kg .....</b>	<b>83</b>
<b>Anexo J: Calor latente de vaporización a diferentes temperaturas, kcal/kg .....</b>	<b>84</b>
<b>Anexo K: Entalpía del agua en estado líquido a diferentes temperaturas, kcal/kg .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo L: Entalpía del agua de mar en función de la salinidad y la temperatura, kJ/kg .....</b>	<b>86</b>
<b>Anexo M: Calor específico del agua de mar en función de la salinidad y la temperatura, J/kg K.....</b>	<b>87</b>
<b>Anexo N: Densidad del agua de mar en función de la salinidad y la temperatura, kg/m<sup>3</sup> ..</b>	<b>89</b>

---

---

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama general del proceso de desalinización usando un secador por aspersión. ....	16
<b>Figura 2.</b> Etapa 1 de la desalinización de la salmuera. ....	17
<b>Figura 3.</b> Etapa 2 de la desalinización de la salmuera. ....	18
<b>Figura 4.</b> Diagrama que muestra los parámetros que cambian y los que permanecen constantes en un proceso de calentamiento. “Adaptado de Chemical Engineers Handbook, John H. Perry” .....	19
<b>Figura 5.</b> Etapa 3 de la desalinización de la salmuera. ....	21
<b>Figura 6.</b> Etapa 4 de la desalinización de la salmuera. ....	22
<b>Figura 7.</b> Diagrama que muestra los parámetros que cambian y los que permanecen constantes en un proceso de secado. “Adaptado de Chemical Engineers Handbook, John H. Perry” .....	22
<b>Figura 8.</b> Diagrama incluyendo la Etapa 5 del proceso de desalinización de la salmuera. ....	25
<b>Figura 9.</b> Diagrama de la composición de los flujos de entrada y salida en el condensador. ....	26
<b>Figura 10.</b> Diagrama que muestra los cambios de entalpías que hay que considerar en un cambio de fase de vapor a líquido (condensación).....	28
<b>Figura 11.</b> Distribuciones de temperatura para un intercambiador de calor en contraflujo, adecuando la nomenclatura al sistema de estudio. ....	29
<b>Figura 12.</b> Esquema representando el perfil de temperatura del sistema. ....	31

---

<b>Figura 13.</b> Efecto de la temperatura del aire en la masa del aire seco requerido a la entrada del secador y en la masa de agua condensada obtenida. ....	34
<b>Figura 14.</b> Efecto de la temperatura del aire a la entrada del secador a diferentes valores del cambio de entalpía, antes y después del calentamiento del fluido .....	35
<b>Figura 15.</b> Efecto de la temperatura del aire a la entrada del secador con respecto al calor requerido por el secador por aspersión, el calor retirado por el agua de mar en el condensador y con respecto al rendimiento de obtención de agua potable. ....	37
<b>Figura 16.</b> Efecto de la temperatura del aire seco en la entrada del secador con respecto a la temperatura del aire en la etapa 4 del proceso y en la diferencia de humedad absoluta entre la etapa 4 y 5. ....	39
<b>Figura 17.</b> Efecto de la temperatura de la salmuera en la masa del aire seco requerido y en la masa de agua condensada obtenida. ....	42
<b>Figura 18.</b> Efecto de la temperatura de la salmuera en el calor requerido por el secador por aspersión, el calor retirado por el agua de mar en el condensador y en el rendimiento del agua potable del sistema. ....	43
<b>Figura 19.</b> Efecto del porcentaje de la humedad relativa del aire con la masa de aire seco requerido en la entrada del secador y con la masa de agua condensada obtenida. ....	46
<b>Figura 20.</b> Efecto del porcentaje de humedad relativa del aire en el calor requerido por el secador por aspersión, el calor retirado por el agua de mar en el condensador y en el rendimiento del agua potable del sistema. ....	47
<b>Figura 21.</b> Efecto de la concentración de la salmuera en la masa del aire seco requerido a la entrada del secador y en la masa de agua condensada obtenida.....	50
<b>Figura 22.</b> Efecto de la concentración de la salmuera en el calor requerido por el secador por aspersión, el calor retirado por el agua de mar en el condensador y en el rendimiento del agua potable del sistema. ....	51

---

<b>Figura 23.</b> Valores reales del a) %HR y b) temperatura de bulbo seco del 3 de abril y 2 de mayo. ....	53
<b>Figura 24.</b> Valores reales del a) %HR y b) temperatura de bulbo seco del 20 de junio y 21 de diciembre.....	56
<b>Figura 25.</b> Valores reales del a) %HR y b) temperatura de bulbo seco del 21 de marzo y 21 de septiembre. ....	57
<b>Figura 26.</b> Página principal indicando el diagrama del simulador termodinámico que se desarrolló para la desalinización de la salmuera usando un equipo de secado por aspersion. ....	61

---

---

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valores de los parámetros de entrada del Caso 1.....	32
<b>Tabla 2.</b> Resultados fijos obtenidos al variar la temperatura del aire a la entrada del secador por aspersion.....	33
<b>Tabla 3.</b> Resultados obtenidos al cambiar la temperatura del aire a la entrada del secador por aspersion. ....	33
<b>Tabla 4.</b> Valores de la entalpía que se tiene antes y después del calentamiento del aire seco a diferentes temperaturas. ....	35
<b>Tabla 5.</b> Comportamiento de la temperatura de la mezcla de aire seco más vapor de agua en la salida del secador por aspersion.....	36
<b>Tabla 6.</b> Valores de la masa de vapor de agua obtenida y su temperatura después del proceso de secado, así como los valores de la humedad absoluta en el punto 4 y 5 del proceso, a diferentes temperaturas del aire seco de entrada al secador. ....	39
<b>Tabla 7.</b> Valor de los parámetros de entrada del Caso 2.....	40
<b>Tabla 8.</b> Resultado fijo obtenido al variar la temperatura de la salmuera a la entrada del secador por aspersion.....	40
<b>Tabla 9.</b> Resultados obtenidos al cambiar la temperatura de la salmuera a la entrada del secador por aspersion.....	41
<b>Tabla 10.</b> Valor de los parámetros de entrada del Caso 3.....	44
<b>Tabla 11.</b> Resultados fijos obtenido al variar el porcentaje de humedad relativa del aire atmosférico.....	45

---

<b>Tabla 12.</b> Resultados obtenidos al cambiar el porcentaje de humedad relativa del aire atmosférico.....	45
<b>Tabla 13.</b> Valor de los parámetros de entrada del Caso 4.....	48
<b>Tabla 14.</b> Resultados obtenidos al cambiar el valor de la concentración de la salmuera. .....	49
<b>Tabla 15.</b> Resultados promedios por hora del %HR y la temperatura de bulbo seco del aire atmosférico del día 3 de abril y 2 de mayo. ....	54
<b>Tabla 16.</b> Valor de los parámetros de entrada del Caso 5.....	54
<b>Tabla 17.</b> Relación de algunos parámetros de estudio con respecto a un litro de salmuera entrante al sistema, simulando 6 horas de trabajo de los días 3 de abril y 2 de mayo del mes típico del TMY.....	55
<b>Tabla 18.</b> Relación de algunos parámetros de estudio con respecto a un litro de salmuera entrante al sistema, simulando 6 horas de trabajo de los días 20 de junio y 21 de diciembre del mes típico del TMY.....	58
<b>Tabla 19.</b> Relación de algunos parámetros de estudio con respecto a un litro de salmuera entrante al sistema, simulando 6 horas de trabajo de los días 21 de marzo y 21 de septiembre del mes típico del TMY. ....	58



---

---

## NOMENCLATURA

<b>Símbolo</b>	<b>Definición</b>
$\bar{c}_{p,MAR}$	Calor específico del agua de mar a presión constante (J/kg K)
$C_{p,s}$	Calor específico de la salmuera a presión constante (J/kg K)
$\Delta h_{aire}$	Cambio de entalpía del aire (kJ/kg aire seco)
$h_{AC,5}$	Entalpía del agua condensada que sale del condensador (kJ/kg)
$h_{aire,2A}$	Entalpía del aire atmosférico, antes del calentamiento (kJ/kg aire seco)
$h_{aire,2B}$	Entalpía del aire después del calentamiento (kJ/ kg aire seco)
$h_{aire,2i}$	Entalpía del aire a las condiciones $i$ (kJ/kg aire seco)
$h_{aire,4}$	Entalpía del aire seco a la salida del secador por aspersion (kJ/kg aire seco)
$h_{LÍQ,5}$	Entalpía del agua líquida a la temperatura $T_5$ (kJ/kg)
$h_{LÍQ,w}$	Entalpía del agua líquida a la temperatura $T_w$ (kJ/kg)
$h_{MAR,6}$	Entalpía del agua de mar que entra al condensador (kJ/kg)
$h_{MAR,7}$	Entalpía del agua de mar que sale del condensador (kJ/kg)
$h_{VA,4}$	Entalpía del vapor de agua que entra al condensador a la temperatura $T_4$ (kJ/kg)
$h_{VA,w}$	Entalpía del vapor de agua a la temperatura $T_w$ (kJ/kg)

---

$h_{VP,5}$	Entalpía del vapor de agua perdido que sale del condensador a la temperatura $T_5$ (kJ/kg)
$\%HR_{,2i}$	Porcentaje de humedad relativa del aire en condiciones $i$ (%)
$\%HR_{,A}$	Porcentaje de humedad relativa del aire húmedo a la salida del secador por aspersion (%)
$\%H_{SAL}$	Porcentaje de humedad de la sal (%)
$L_{vap,s}$	Calor latente de vaporización de la salmuera (kJ/kg)
$M_{1A}$	Volumen de entrada de la salmuera (litros)
$M_{1B}$	Masa de entrada de la salmuera (kg)
$M_3$	Masa húmeda total de sal (kg)
$M_4$	Masa del aire y vapor de agua (aire húmedo) cuando salen del secador, y entran al condensador (kg)
$M_5$	Masa del agua condensada, aire perdido y vapor de agua perdido (aire húmedo perdido) cuando salen del condensador (kg)
$M_{AC,5}$	Masa del agua condensada cuando sale del condensador (kg)
$M_{AGUA,1B}$	Masa del agua contenida en la salmuera cuando entra al secador por aspersion (kg)
$M_{AGUA,2A}$	Masa del agua contenida en el aire húmedo cuando entra al secador por aspersion (kg)
$M_{AGUA,3}$	Masa del agua contenida en la sal cuando sale del secador por aspersion (kg)
$M_{AIRESECO,2A}$	Masa de entrada del aire seco a la entrada del secador por aspersion (kg)

---

$M_{AIRESECO,4}$	Masa de entrada del aire seco a la entrada del condensador (kg)
$M_{AIRESECO,perdido}$	Masa del aire seco perdido que sale del condensador (kg)
$M_{seco,3}$	Masa seca de sal (kg)
$M_{MAR}$	Masa del agua de mar (kg)
$M_{MAR,6}$	Masa de entrada del agua de mar al condensador (kg)
$M_{MAR,7}$	Masa de salida del agua de mar al condensador (kg)
$M_{SAL,1}$	Masa de sal contenida en la salmuera a la entrada del secador por aspersion (kg)
$M_{SAL,3}$	Masa de sal en la salida del secador por aspersion (kg)
$M_{VA,4}$	Masa de vapor de agua que sale del secador y entra al condensador (kg)
$M_{VP,5}$	Masa del vapor perdido que sale del condensador (kg)
$P_{s,vap}$	Presión parcial de vapor de la salmuera (kPa)
$P_{s,vapsat}$	Presión de vapor saturado de la salmuera (kPa)
$P_T$	Presión total de operación (kPa)
$P_{w,sat,4}$	Presión de vapor saturado del vapor de agua a la entrada del condensador (kPa)
$P_{w,4}$	Presión parcial de vapor de agua a la entrada del condensador (kPa)
$P_{w,sat,5}$	Presión de vapor saturado del vapor de agua a la salida del condensador (kPa)

---

$P_{w,5}$	Presión parcial de vapor de agua a la salida del condensador (kPa)
$Q_7$	Calor retirado por el agua de mar al vapor de agua en la etapa de condensación (MJ)
$Q_{latente,s}$	Calor latente de la salmuera (kJ)
$Q_{SDRY}$	Calor total requerido por el sistema para procesar la salmuera (MJ)
$Q_{sensible,s}$	Calor sensible de la salmuera (J)
$T_{1A}$	Temperatura de la salmuera cuando sale de la planta de ósmosis inversa (°C)
$T_{1B}$	Temperatura de la salmuera antes de entrar al secador por aspersión (°C)
$T_{2i}$	Temperatura del aire en condiciones $i$ (°C)
$T_4$	Temperatura del aire y vapor de agua (aire húmedo) cuando salen del secador (°C)
$T_5$	Temperatura de salida del agua condensada y el aire húmedo en el condensador (°C)
$T_6$	Temperatura del agua de mar a la entrada del condensador (°C)
$T_7$	Temperatura del agua de mar a la salida del condensador (°C)
$T_{A,5}$	Temperatura del agua condensada en la salida del condensador (°C)

---

$T_{MAR,6}$	Temperatura de entrada del agua de mar en el condensador, con sufijo MAR para diferenciarlo en el arreglo en contraflujo del condensador (°C)
$T_{MAR,7}$	Temperatura de salida del agua de mar en el condensador, con sufijo MAR para diferenciarlo en el arreglo en contraflujo del condensador (°C)
$T_{VA,4}$	Temperatura del vapor de agua a la entrada del condensador (°C)
$T_w$	Temperatura de rocío (°C)
$W_{2A}$	Humedad absoluta a la entrada del secador (kg vapor de agua/kg aire seco)
$W_4$	Humedad absoluta a la salida del secador o a la entrada del condensador (kg vapor de agua/kg aire seco)
$W_5$	Humedad absoluta a la salida del condensador (kg vapor de agua/kg aire seco)
$X_1$	Salinidad de la salmuera o concentración de sal que contiene la salmuera (gramos de NaCl/litro de salmuera)
$X_{MAR}$	Salinidad del agua de mar (gramos de NaCl/litro de agua de mar)

---

## AGRADECIMIENTO

A Dios, gracias por darme buen entendimiento, habilidades y capacidades para aprender cosas nuevas y seguir adelante.

A mis padres y hermana por su amor y apoyo incondicional en cada momento, son mi gran inspiración y fuente de motivación. Gracias por su ayuda, esfuerzo y sacrificio. Gracias por motivarme a seguir adelante, superarme y a alcanzar mis metas. Gracias por sus oraciones, sus consejos, abrazos y sus palabras de aliento. Les amo mucho.

A mi director de tesis por abrirme las puertas para realizar este proyecto de investigación. Gracias por haber confiado en mí, por su tiempo y paciencia. Gracias por brindarme de su conocimiento y guiarme durante todo el desarrollo del proyecto. A mis sinodales, gracias por su tiempo, conocimiento y sus enseñanzas, gracias por brindarme de su mano cuando me atoraba con algo o tenía alguna duda. Gracias a ambos por motivarme a seguir adelante.

A mis amigos de la maestría por compartir de su conocimiento, por darme momentos de alegría y felicidad. Gracias por su apoyo y motivación, gracias por haber aportado buenas cosas a mi vida.

A mi amiga Sophia por su hermosa e incondicional amistad. Gracias por haberme hablado de la maestría y por haberme motivado a iniciar este escalón. Gracias por cada momento que compartí contigo, por tu apoyo incondicional y tus porras. Nunca dejaste que me diera por vencida y siempre tenías palabras de aliento para mí.

A mis amigos y líderes de la Iglesia por darme momentos de diversión, risa y alegría. Gracias por sus oraciones y por motivarme a seguir adelante. Gracias por sus lindas palabras, su apoyo y sus ánimos.

A mis tíos y primos cercanos por brindarme de su compañía y calidez. Gracias por sus abrazos y gestos de cariño hacia mí.

---

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgado durante los dos años de estudio, así como su apoyo en la estancia de investigación que realicé en el extranjero.

A la División de Ingeniería y al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, por sus apoyos económicos en los congresos para presentar mi trabajo de investigación.

A todas las personas que de una u otra manera hicieron posible este trabajo y han contribuido para el logro de mis objetivos. ¡Muchas gracias!

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

#### Introducción

Los cambios climatológicos y el crecimiento de la población humana han generado una escasez de agua potable. Muchas personas viven sin ese beneficio, y tienen que desplazarse a otros pueblos o lugares lejanos para obtenerlo. INEGI señaló el 21 de Marzo del 2018, en la Revista “El Sol de México”, de la Ciudad de México, que 44 millones de mexicanos se encuentran sin agua en sus hogares (Durán, 2018).

En comparación con otros países de América, INEGI establece que México ocupa el segundo lugar en extensión litoral, correspondiente a 11,592.76 km (Instituto Nacional de Estadística, 1991). Por otra parte, la Secretaría de Energía (SENER) indica que México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional, situación que resulta ideal para el aprovechamiento de la energía solar, ya que la irradiación global media diaria es de alrededor de 5.5 kWh/m<sup>2</sup>, colocando al país dentro de los primeros lugares en el mundo ((SENER), 2012). Esto nos indica que hay muchas zonas costeras que pueden ser beneficiadas y aprovechadas, desarrollando nuevas tecnologías limpias. Pero no hay que pensar solamente en la solución de problemas de nuestro país, porque hoy en día el utilizar el recurso solar es una realidad y el agua una necesidad; surgiendo así una gran oportunidad de desarrollo, para extendernos a beneficiar otros países del mundo, estudiando una tecnología solar sustentable que se ha estudiado poco, e implementando un proceso menos contaminante de los que conocemos en la actualidad.

Entre todas las tecnologías empleadas para la obtención de agua que contiene una alta concentración de sal, destaca la desalinización. La desalinización, resuelve la



problemática de la falta de agua de calidad, y se ha convertido en un proceso importante que en las últimas décadas ha aumentado y desarrollado considerablemente. Actualmente, existen diversos procesos de desalinización, de los cuales destacan la: destilación flash en múltiple etapa (MSF), destilación múltiple efecto (MED), destilación solar, ósmosis inversa y electrodiálisis (Lechuga et al., 2007). En todas ellas, se obtiene un producto de beneficio, agua potable; y se genera un residuo conocida como salmuera.

De acuerdo a “The International Desalination Association (IDA)” en el reporte anual de Water Security Handbook 2019-2020, se establece que en todo el mundo hay alrededor de 17,000 plantas desalinizadoras distribuidas en 174 países. Las plantas desalinizadoras seguirán creciendo, pero dicho crecimiento no ha estado acompañado por una investigación del impacto de la salmuera, cuyo control y gestión hay que regular y adecuar. Una de las mayores preocupaciones en el vertido de la salmuera al mar, es el incremento notable de la salinidad, que puede tener efectos nocivos sobre el ambiente, y representa niveles superiores considerables como tolerables por algunas especies marinas (De la Fuente et al., 2008). De los pocos estudios que se tienen, la literatura indica que en las zonas de vertido se han detectado reducciones de plancton y organismos bentónicos como las algas, fanerógamas marinas, esponjas, gorgonias, corales, estrellas, erizos, poliquetos serpúlidos, sabélidos, crustáceo balano. No obstante, la afectación a los peces es indirecta, porque se reduce su fuente de alimento; pero, aun así, es significativo el impacto negativo que no debe ser concluyente (Gacía and Ballesteros, 2001). El eficaz tratamiento de éstas aguas es elemental para reducir los posibles efectos adversos que el vertido de efluentes pueda tener en el medio marino (Boluda Botella & Egea Llopis, 2017).

Por otro lado, está el hecho de que en muchas zonas con plantas de ósmosis inversa, poseen un buen potencial para desarrollar alguna energía alterna, especialmente la eólica o la solar (Moya, 1997). La energía solar es una fuente de energía que destaca porque es inagotable, renovable y al utilizarla no genera contaminación. Dentro de la energía solar, se encuentra la energía solar térmica, el cual permite calentar fluidos. De esta manera, se pretende aprovechar la radiación solar para calentar la salmuera y el aire atmosférico que se requerirá en el proceso.

En un secador por aspersión ocurre la atomización de un líquido concentrado para transformarse en un sólido o polvo seco; ésta transformación se produce por el contacto de una corriente de gas caliente (López Hernández, 2010). Por consiguiente, es importante tomar en cuenta parámetros y condiciones de operación para que se lleve a cabo el buen funcionamiento del proceso de secado, así que, la transferencia de materia y energía son puntos que se realizarán para el análisis termodinámico y el desarrollo del simulador.

Por último, hay que enfatizar que, debido al uso de plantas de ósmosis inversa y su continuo crecimiento, es pertinente la elaboración de ésta investigación, para poder darle un uso adecuado al desecho de éstas plantas. El secador por aspersión será nuestro equipo a estudiar, y la salmuera será la materia prima a utilizar, para que no sea desechada al mar y así prevenir alteraciones en el medio litoral.

### **Justificación**

La justificación de este proyecto de investigación incluye los siguientes puntos: aprovechar un desecho de las plantas de ósmosis inversa para tener un impacto cero al medio ambiente marino, aprovechar el uso de energías renovables especialmente la energía solar térmica para el calentamiento de dos fluidos de trabajo del proyecto; y finalmente, obtener dos productos de beneficio: agua y sal.

### **Objetivo General**

Estudiar termodinámicamente el proceso de secado por aspersión para producir agua condensada y sal, usando salmuera de afluentes de plantas desalinizadoras de ósmosis inversa como materia prima y radiación solar como fuente de energía.

## Objetivos Específicos

- Obtener expresiones matemáticas de los diferentes parámetros que participan en el proceso, los cuales están en función de la temperatura y la concentración de la salmuera.
- Desarrollar un simulador matemático con los balances de materia y energía considerando las corrientes de los flujos en equilibrio termodinámico para el secado de la salmuera haciendo uso de un secador por aspersion.
- Realizar estudios paramétricos del comportamiento del proceso modelado, efectuando casos de estudio.
- Realizar un estudio paramétrico utilizando días representativos tomados del mes típico del Año Típico Meteorológico (TMY) de Hermosillo, Sonora.

## Metodología general

Para el desarrollo del proyecto se realizará un simulador termodinámico con un enfoque macroscópico para observar el comportamiento de varios parámetros de estudio como la temperatura y concentración de la salmuera; así como, el porcentaje de humedad relativa y la temperatura del aire atmosférico a la entrada del secador por aspersion. Las variables principales serán monitoreadas y analizadas en una tabla de resultados. Se estudiarán cada una de las condiciones para conocer el motivo del comportamiento.

Además, se utilizarán días representativos tomados del mes típico del TMY para obtener los valores del porcentaje de humedad relativa y la temperatura de bulbo seco del aire atmosférico, con el fin de tomar valores reales, añadirlos al simulador y estudiar el comportamiento obtenido.

Finalmente, se establecerán relaciones de la cantidad de aire seco que se requiere, cantidad de agua condensada obtenida, cantidad de sal obtenida, flujo de agua de mar necesario en el condensador y la energía total que se requiere en el sistema; por cada litro de salmuera que entra al proceso propuesto. Al conocer las cantidades máximas y

mínimas que se requieren o que se obtendrán, se hará una comparación con otros tipos de destiladores solares.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

#### 2.1. Procesos de Desalinización

En las últimas décadas, para cubrir el déficit de agua, se ha estado haciendo uso de las tecnologías de desalinización (Chen et al., 2016). Los procesos de desalinización tienen un objetivo en común: reducir la concentración de sales disueltas del agua, para obtener agua consumible. Por otro lado, cada proceso difiere por el valor del consumo energético, los costos de operación, el impacto ambiental y la calidad de producto final (Dévora-Isiordia et al., 2013). A continuación, se hace una breve descripción de las características significativas de los métodos más importantes.

Las plantas que funcionan con Destilación Flash Multietapa (MSF, por sus siglas en inglés) y Destilación de Múltiple Efecto (MED, por sus siglas en inglés), se caracterizan por desalinizar grandes volúmenes de agua de mar, aunque lamentablemente generan muchos residuos con alto contenidos de sales, y además, requieren de un alto consumo energético y un mantenimiento de la maquinaria que es costosa; e incrementa ese costo aún más, cuando se tienen más etapas o efectos en el proceso (Lechuga et al., 2007).

En la destilación solar (DS) se utiliza la energía solar para calentar el agua salada que se encuentra dentro de un recipiente o estanque poco profundo. Mientras la temperatura aumenta, el agua se evapora, y el vapor que se produce se condensa con ayuda de una cubierta con pendiente que desliza el agua y se colecta (Moya, 1997).

La obtención de agua por medio de la Electrodialisis (ED) no se efectúa por medio de un cambio de fase, sino que su proceso se basa en un intercambio iónico. Éste tipo de desalinización se utiliza para aguas salobres ya que se obtiene agua con una reducción

de salinidad de alrededor 40% y, por otro lado, se obtiene salmuera. Hay inconveniente con las membranas semipermeables que se utilizan, ya que son caras y durante la operación puede tener incrustaciones que reduce su duración (Arreguín Cortés & Martín Domínguez, 2000).

Por último, la Ósmosis Inversa (OI) es el proceso más utilizado para la desalinización de agua. Desafortunadamente, las membranas son caras y deben ser resistentes a la diferencia de presión que se lleva a cabo durante el proceso (Arreguín Cortés & Martín Domínguez, 2000). La presión que se aplica depende del grado de salinidad de la solución, por ejemplo, en las aguas salobres la presión está entre 17 y 27 bares; y en el agua de mar va desde 55 hasta 82 bares (De la Cruz, 2006). Por otro lado, no es necesario calentar el agua de mar, así que, la mayor parte de la energía requerida está al presurizar la alimentación de agua de mar (Ghalavand et al., 2015). A pesar de eso, ésta técnica es la más empleada debido al bajo consumo de energía, en comparación con otros sistemas existentes (Torquemada et al., 2004). Además, puede operar a cualquier capacidad de producción, sin embargo, el desecho de la salmuera es importante tratarla para evitar daños al ambiente (Lechuga et al., 2007).

Los sistemas de desalinización se dividen en dos: sistemas térmicos y sistemas de membranas. Las plantas que trabajan por sistemas térmicos, tienen un factor de conversión del 10% al 20%; y las plantas que trabajan con membranas, tienen un factor de conversión del 35% al 45% rechazo (Dévora-Isiordia et al., 2013; Solís Hernández, 2015). Esto quiere decir que, si se añade al sistema de desalinización 1000 litros de agua de alimentación, y se toma como base, un porcentaje de conversión del 45%, estaremos obteniendo 450 litros de agua como producto y el resto (550 litros) sería considerado como el rechazo.

El volumen residual (rechazo) de las plantas de ósmosis inversa es menor comparado con algún sistema térmico; pero el desecho, adquiere un alto contenido de sales (Gacía and Ballesteros, 2001). Para conocer la cantidad de sal que tiene el desecho, se utiliza el término: factor de concentración. En las plantas que utilizan sistemas de membranas, el valor es de 1.5 a 2 (Quevedo Albuquerque & Rosales Samillán, 2009); esto significa que, si el agua de alimentación entro con una salinidad de 35 gramos/litro, el agua de

rechazo tendrá una concentración de 52.5 a 70 gramos/litro. Por otro lado, en un artículo, se establece que la salinidad de la salmuera de una planta de ósmosis inversa esta alrededor de 43-90 ups (Unidades Prácticas de Salinidad) (Torquemada et al., 2004), el cual es equivalente a 43 - 90 gramos/litro.

Cada uno de los métodos anteriores tiene un lado positivo y otro negativo, éste último es importante analizarlo, permitiéndonos enfocarnos en el impacto ambiental que genera el desecho de las plantas al tener una liberación masiva y continua.

## **2.2. Métodos de disposición de Salmuera**

Actualmente, hay plantas que descargan la salmuera en la superficie de las aguas, es decir, en el mar, ríos, bahías o lagos, éste método es llamado: eliminación en aguas superficiales. Resulta ser la opción menos costosa, y adecuada cuando se maneja grandes volúmenes, pero puede causar efectos negativos al medio acuático (Dévora-Isiordia et al., 2017). Para evitar la contaminación, la mayoría de las plantas desalinizadoras llevan a cabo una dilución, utilizando mecanismos de mezcla activa, por ejemplo, difusores artificiales o determinadas condiciones hidrodinámicas locales, en donde las olas y las corrientes mezclan la salinidad. A pesar de llevar a cabo lo anterior, existe un gran número de especies marinas que son afectados, debido a que, muchas veces, el mecanismo de difusión no es el adecuado, o no se hace de manera correcta, y/o porque la selección de la zona de descarga del vertido no es la apropiada. La magnitud del impacto depende de la concentración de la salmuera; la profundidad, marea y corriente del mar; así como de las condiciones biológicas del medio marino receptor (Heck et al., 2016; Palomar Herrero & Losada Rodríguez, 2008; Torquemada et al.).

I. Alameddine y colaboradores (Alameddine & El-Fadel, 2007), describieron algunos otros métodos de descarga de la salmuera, enfatizándose en las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Los autores mencionan como método de descarga: la descarga directa a la superficie de agua, descarga a una planta de tratamiento de aguas residuales, eliminación por descarga a pozos profundos, aplicaciones en suelos,

estanques de evaporación, procesos para tener una descarga cero y la combinación con aguas de enfriamiento o efluentes de tratamientos de agua para después, descargarlo en aguas residuales.

Dévora Isiordia y colaboradores (Dévora-Isiordia et al., 2017), propusieron una técnica apropiada para disponer del vertido del agua de rechazo con la operación de una granja acuícola para cultivar y producir camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) con valor comercial en el Valle del Yaqui, Sonora, México. La granja acuícola utilizó aguas de rechazo con una salinidad de 6.5 y 7 g/L. Una vez que se haya utilizado el rechazo en la granja acuícola y se requiera cambiar el agua, el agua de la granja se trasladará a una salinera de la región, para evitar las descargas directas al ambiente. De esta forma, están disponiendo de la salmuera, sin afectar el medio marino.

Por otro lado, Bumjoo Kim y colaboradores (Kim et al., 2016) exponen el uso de la desalinización eléctrica del ICP (Polarización de Concentración de Iones) para darle tratamiento al agua con alto contenido de sal de hasta 100 g/L mediante el uso de membranas en una operación de múltiples etapas. Además, comentan que, la Compresión Mecánica de Vapor (MVR) es otra opción para el tratamiento de la salmuera de hasta 125 g/L; pero, la limitación es que requieren de un alto gasto de capital.

Argyris Panagopoulos y colaboradores (Panagopoulos et al., 2019), elaboraron un resumen de las tecnologías que hay para disponer de la salmuera después del proceso de desalinización. Con respecto a los métodos anteriores que hemos mencionado, detallan que esos métodos resultan insostenibles y restringidos por el alto capital que demandan, además de que en muchos sitios no podría aplicarse (no-universal). Hoy en día, se buscan tecnologías para el tratamiento de la salmuera con procesos que resulten menos contaminantes al medio ambiente, minimizando el volumen de desecho y sacándole el máximo provecho a la desalinización, es decir, recuperando la mayor cantidad de agua posible. Estas tecnologías son llamadas: Descarga Cero del Líquido (ZLD, por sus siglas en inglés), los cuales se dividen en tecnologías de base térmica y en membranas. Dentro de la tecnología de base térmica se encuentra el secado por aspersión.



### 2.2.1. Normatividad

En el año 2009, R. González y colaboradores (González & Dévora, 2009), presentaron un anteproyecto de Norma Oficial Mexicana que establece las concentraciones adecuadas que deben tener los vertidos de salmuera de las plantas desalinizadoras, para evitar alterar el equilibrio natural del ambiente acuático. Se establecieron las condiciones realizando estudios en la región del Mar Cortés en los estados de Sonora y Baja California; y en la región del Mar Caribe en el Estado de Quintana Roo cubriendo el 80% del total de plantas desalinizadoras en México. Asimismo, caracterizaron el vertido de la salmuera, evaluaron el efecto de dispersión de la salmuera a diferente distancia y profundidad del punto de descarga; y determinaron la toxicidad en dos especies de fauna marina: camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) y erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*). Los autores estipularon lo siguiente: “El vertido de salmuera deberá de hacerse en la franja de mar abierto más 200 metros de tuberías como mínimo, donde existe gran oleaje que permita la dispersión y disolución del vertido, además es deseable buscar corrientes marinas para la disposición final que garantice su inmediata disolución”. En el ANEXO A se muestra una Tabla que contiene los límites máximos permisibles de composición iónica que representan los autores.

Años más tarde, Devora Isiordia y colaboradores (Dévora-Isiordia et al., 2017), destacan que en la actualidad, no existe una normatividad vigente a nivel mundial que haga una regulación y control de los efectos ambientales que pudiese crear los productos y desechos de plantas desalinizadoras. Pero enfatizan que, en México, a nivel nacional, existe un anteproyecto de Norma Oficial Mexicana llamada: PROY-NOM-013-CONAGUA/SEMARNAT-2015, que ya fue avalada y sometida a evaluación, el cual tiene relación con el autor R. González y colaboradores que se explicó en el párrafo anterior.

### 2.2.2. Efectos de la descarga de la salmuera al mar

Numerosos investigadores han estudiado el efecto que se tiene al descargar la salmuera al mar. Dévora Isiordia y colaboradores (Dévora-Isiordia & Astorga-Trejo, 2018) realizaron una evaluación del efecto del vertido de plantas desalinizadoras de la costa de Puerto Peñasco, analizando la cantidad Total de Sólidos Disueltos (SDT) en

muestreos puntuales por tierra y por mar, sumando un total de 38 muestras. Concluyen que, por la presencia de alto oleaje y mareas en los puntos muestreados, no hay alteraciones por acumulación de sales y otros sólidos, es decir, hay una buena disolución o dispersión del vertido de la salmuera. Muestran resultados dentro de una línea de tendencia que se encuentra en el rango correcto de las características del agua de mar; descartando, hasta ese momento, un efecto negativo.

Químicamente, la salmuera, no se considera un contaminante, debido a que se asemeja al agua de mar pero con un poco más de concentración de sales. No obstante, la salmuera que sale de las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa, contiene aditivos químicos para la depuración del agua de mar previo al paso de las membranas, destacándose el hipoclorito sódico comercial, bisulfito o metasulfito sódico, anticrustantes, ácido sulfúrico y cloruro férrico (como coagulante), éstos se añaden en pocas cantidades y pueden ser consideradas despreciables (Palomar Herrero & Losada Rodríguez, 2008), pero de igual manera, es importante un análisis y evaluación de los efectos de esos aditivos químicos.

Por otro lado, se han encontrado estudios e investigaciones científicas que han detectado que la salmuera vertida al mar tiene efectos negativos. Por ejemplo, hay un estudio basado en la desalinización de España (Gacía & Ballesteros, 2001), este estudio se realizó por el aumento considerable de plantas desalinizadoras que se han instalado en los últimos años, lo cual implica un aumento significativo en la cantidad de salmuera que se vierte al mar. Estudios realizados sobre el Mar Mediterráneo indican que hay organismos que pueden ser afectados por el cambio de salinidad y temperatura que hay en la zona del vertido, debido a que el incremento de salinidad conlleva a la afectación del metabolismo del nitrógeno y del carbono. Por lo que, existe afectación en una especie de planta llamada *Posidonia oceánica*. Conjuntamente, la literatura indica que las algas mediolitorales toleran las variaciones de salinidad, sin embargo, las algas infralitorales, no soportan las altas concentraciones de salinidad, por lo que éstas últimas son sensibles a los vertidos. De igual manera, los poliquetos serpúlidos, sabélidos y el crustáceo balano son afectados.

Al mismo tiempo, Palomar Herrero y Losana Rodríguez (Palomar Herrero & Losada Rodríguez, 2008), también realizaron investigaciones en zonas del Mar Mediterráneo e indicaron que los organismos bentónicos son intolerantes a las variaciones de salinidad, así como otras especies como los bivalvos y las comunidades de equinodermos (que incluye el erizo *Paracentrotus Lividus* y el misidáceo *Leptomysis posidoniae*). Mencionan que también afecta a la fauna marina, tales como las fanerógamas marinas (como la *Cymodocea nodosa*), la *Zostera noltii* y el alga *Caulerpa prolifera*. Lamentablemente, si la salmuera no se descarga en un área hidrodinámica que permita la dilución, afectará a los organismos bentónicos incluso en puntos lejanos. La literatura reporta que puede llegar a afectar hasta 3,500 metros de la zona de descarga.

Del mismo modo, cuando se descarga la salmuera combinada con aguas residuales domésticas, Rodrigo Riera y colaboradores (Riera et al., 2013), encontraron una afectación con los organismos meiofaunales, especialmente nematodos (incrementan) y copépodos harpacticoides (disminuyen). Observaron éstos efectos solamente en muestras cercanas al punto de vertido, y disminuyó la afectación en los puntos que se encontraban a 15 y 30 metros de la descarga. Las aguas residuales alteran el contenido orgánico y composición bioquímica de los sedimentos y el agua, por lo tanto, en éste caso, el vertido por la composición de las aguas residuales resultó más influyente que por la composición de la salmuera sobre la meiofauna.

Asimismo, Nadine Heck y colaboradores (Heck et al., 2016), hicieron predicciones del impacto de la planta desalinizadora Carlsbad, una pequeña comunidad de la costa del sur de California. Mencionan que cuando se descarga la salmuera puede causar una degradación del ambiente marino incluyendo la eutrofización, fluctuaciones en el pH, cambios en la calidad del agua de mar, cambios en la hidrología de la costa durante una construcción, acidificación del océano, etc.

### **2.2.3. Cero descarga de líquidos**

En los últimos años, hemos visto una mayor atención en los procesos para desalinizar el agua de mar o salobre; pero la desalinización en el tratamiento de la salmuera ha recibido relativamente poca atención (Kim et al., 2016). Es importante mitigar estos

impactos buscando opciones más sustentables, por lo que la investigación el día de hoy se enfoca en el estudio de tecnologías de Cero Descarga de Líquidos (ZLD, por sus siglas en inglés), para minimizar el daño al medio ambiente. ZLD describe una combinación de tecnologías para producir agua fresca, eliminando completamente el líquido de desecho de las plantas de desalinización. Destacan dos categorías, las que se basan utilizando membranas y las que se basan en el uso de la energía térmica. (Panagopoulos et al., 2019).

#### **2.2.4. Secado por aspersión**

Hay artículos que proponen utilizar un método convencional más eficiente y confiable, en donde es posible obtener una separación completa de la sal cuando se añade el agua salada concentrada (Hamawand et al., 2017; Morillo et al., 2014; Zarzo Martinez & Campos Pozuelo, 2011). El secado por aspersión comenzó a utilizarse en el año 1920 aplicándose en la industria de la leche y detergentes. El secador por aspersión sirve para deshidratar una suspensión concentrada y transformarla en un polvo fino. Esto se realiza dentro de una cámara caliente, vaporizando instantáneamente las gotas de agua (Younos, 2005). Además, existen factores que afectan al proceso de secado por aspersión, los cuales se deben tener en cuenta. Dichos factores lo definen Samaneh Keshani y colaboradores (Keshani et al., 2015). Destacan que el proceso de secado por aspersión está principalmente afectado por varios parámetros: velocidad, humedad, temperatura y propiedades termodinámicas del aire de entrada; velocidad, concentración, propiedades reológicas, y propiedades termodinámicas del fluido a secar; así como las especificaciones del atomizador o aspersor.

Hamawand Ihsan y colaboradores (Hamawand et al., 2017), propusieron un sistema de evaporación solar que funciona a presiones reducidas. El agua salada se calienta a 38.7 °C, y después se atomiza. Las gotas pasan a través de una columna de 3 metros. Por medio de la radiación solar, la gota se evapora aproximadamente en 0.6 segundos, obteniéndose sal por la parte inferior de la columna. En el artículo, establecen la importancia de equilibrar la energía recibida del sol con el tamaño de la gota y el tiempo de evaporación, para evitar la congelación del sistema. El desafío de éste proceso radica en la velocidad a la que salen las gotas de la boquilla para que no ocurra una evaporación

en la punta de la boquilla. Además, está limitado a un número de gotas por unidad cúbica de espacio, porque si excede este límite, puede congelar todo el sistema.

Q. Chen y colaboradores (Chen et al., 2018), realizaron un análisis energético, económico y ambiental que conlleva al desalinizar salmuera haciendo uso de un evaporador y condensador dentro de una cámara de aspersion de baja temperatura que funciona a vacío. Dicho análisis resulta interesante porque considera factores de vital importancia para la toma de decisión de la viabilidad de un sistema de desalinización.

Moita Raquel Durana y colaboradores (Moita et al., 2009), desarrollaron un sistema de rociado de salmuera caliente para predecir su comportamiento cuando las gotas están en contacto con el aire atmosférico y los rayos solares del medio exterior. Variaron la inclinación del rociado para establecer la adecuada inclinación que permita obtener la sal seca. Su modelo dinámico fue considerando el modelo de única gota en donde se toman en cuenta aspectos microscópicos. Mencionan otros factores relevantes que utilización en su sistema de rociado, los cuales son: diámetro de la gota, presión de funcionamiento, tipo de boquilla, altura de la boquilla, velocidad del viento y humedad del aire. Es importante destacar que en nuestro proyecto el estudio microscópico no se toma en cuenta, sino que el enfoque que se le da es análisis a nivel macroscópico.

Al comparar y analizar los procesos de desalinización de salmuera que existe actualmente, es evidente el estudio de más procesos que sean eficientes, por lo que, la propuesta del uso de un secador por aspersion resulta ser un método adecuado para el tratamiento de la salmuera.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Formulación del Simulador Matemático

Basado en el estudio y establecimiento de los balances de materia y energía que conllevan un análisis macroscópico de la operación unitaria secado por aspersion, se establecen y se añaden modelos polinomiales que reproduzcan mejor las condiciones de la salmuera y del aire atmosférico entrante al sistema. Suponiendo un equilibrio termodinámico dentro de la cámara del secado por aspersion y que toda la energía requerida para el proceso proviene de sistemas de energía solar; se integran los modelos matemáticos en un simulador que permita realizar estudios paramétricos y obtener los requerimientos energéticos necesarios para efectuar el proceso de secado.

#### 3.2. Descripción del proceso

El proceso inicia con el uso del desecho de las plantas de ósmosis inversa y con un fluido que tenemos en gran cantidad en el ambiente atmosférico. Las corrientes de entrada al secador por aspersion se dividen en dos: salmuera y aire. La salmuera es calentada hasta una temperatura mayor a 50°C para evitar el taponamiento en los aspersores del secador. Por otro lado, está la corriente de aire atmosférico, el cual también es calentado hasta una temperatura adecuada para lograr el secado de la salmuera dentro de la cámara de aspersion. La salmuera y el aire son calentados utilizando un sistema solar térmico conocido como colectores solares. La salmuera caliente entra al secador por aspersion por la parte superior y pasa a través de un aspersor que se encarga de atomizar el líquido, saliendo en forma de gotas hacia la cámara del secador. Dentro de

la cámara de aspersión ocurre el cambio de fase con la ayuda del aire caliente suministrado, haciendo que las gotas de salmuera (líquido) se transformen en partículas de sal (sólido). La sal es obtenida por la parte inferior del secador con una cantidad específica de humedad. Por otro lado, la mayor parte del vapor de agua producido por la evaporación de las gotas de salmuera, salen por la parte superior del secador junto con el aire de entrada que permitió la transferencia de masa y calor dentro de la cámara, por lo que, las combinaciones de estos dos fluidos hacen que el aire salga a un porcentaje alto de humedad relativa y a una temperatura menor que al de la entrada. Por consiguiente, el aire y vapor de agua entran al condensador para obtener agua condensada y liberar al ambiente el aire y el vapor de agua perdido que no se condensó. El fluido utilizado como refrigerante es el agua de mar, es el que está en contacto el vapor de agua dentro del condensador en un arreglo de contraflujo. Finalmente, nuestro proceso termina al obtener el agua condensada (Figura 1).

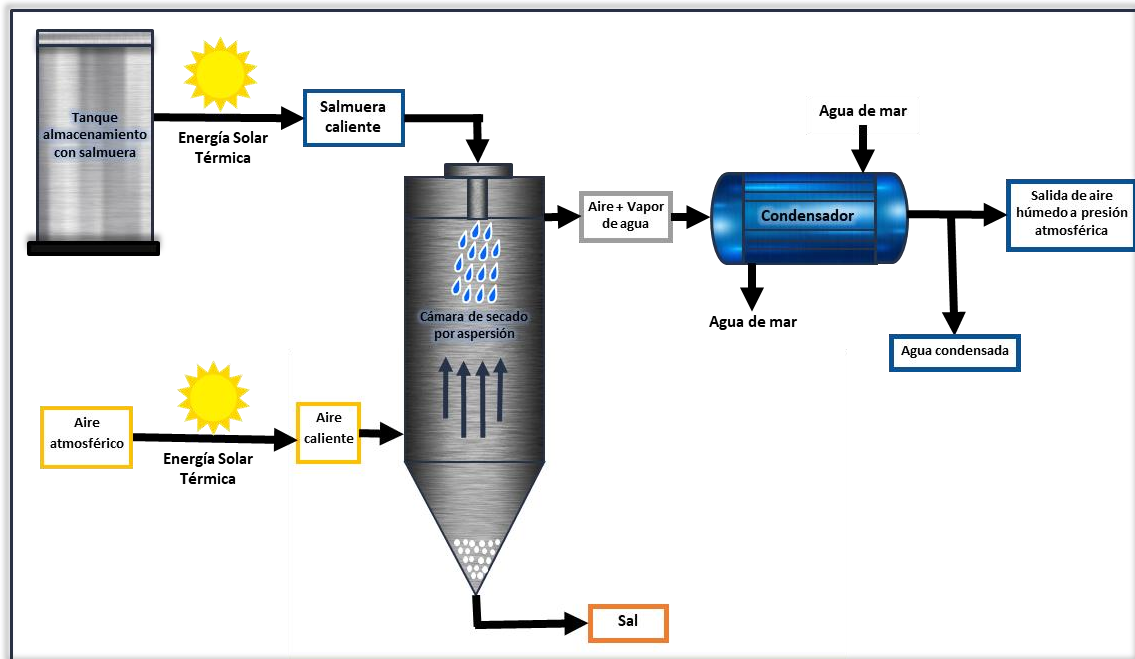


Figura 1. Diagrama general del proceso de desalinización usando un secador por aspersión.

### 2.2.5. Etapa 1: Calentamiento de la salmuera

Se hace uso de la primera ley de la termodinámica conocida también como el principio de la conservación de la energía para la determinación del calor sensible de la salmuera, logrando el calentamiento de la salmuera (Figura 2).

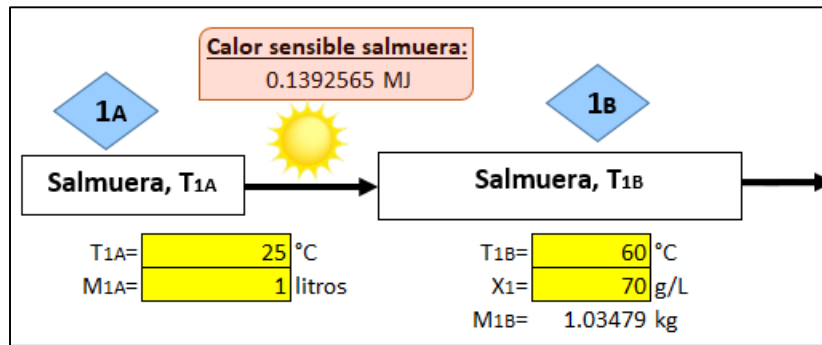


Figura 2. Etapa 1 de la desalinización de la salmuera.

El calor necesario para calentar una cierta cantidad de salmuera, se calcula haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$Q_{sensible,s} = M_{1B}C_{p,s}\Delta T = M_{1B}C_{p,s}(T_{1B} - T_{1A}) \quad (1)$$

Donde  $Q_{sensible,salmuera}$  es el calor necesario para calentar la salmuera,  $M_{1B}$  es la masa de salmuera que se quiere calentar,  $C_{p,s}$  es el valor del calor específico de la salmuera a presión constante,  $\Delta T$  es la diferencia de la temperatura de la salmuera al final del calentamiento ( $T_{1B}$ ) y al inicio del calentamiento ( $T_{1A}$ ). Los valores de  $C_{p,s}$  se obtuvieron haciendo uso de un modelo polinomial que se encuentra en el ANEXO D.

La cantidad de sal y agua que está contenida en la salmuera se obtuvo utilizando la densidad de la salmuera. Los valores de la densidad de la salmuera se obtuvieron haciendo uso de un modelo polinomial que se encuentra en el ANEXO E. Dicho modelo depende de la temperatura y de la concentración de la salmuera.



### 2.2.6. Etapa 2: Calentamiento del aire

Para el calentamiento del aire fue muy importante establecer la cantidad de energía que debe tener el aire para que pueda realizar su trabajo cuando se pone en contacto con las gotas de salmuera dentro de la cámara del secador por aspersion. Dicha cantidad de energía se obtiene con la energía para evaporar la salmuera:

$$Q_{latente,s} = M_{1B}L_{vap,s} \quad (2)$$

Donde  $Q_{latente,s}$  es el calor necesario para evaporar la salmuera,  $M_{1B}$  es la masa de salmuera que se quiere evaporar y  $L_{vap,s}$  es el calor latente de vaporización de la salmuera. Los valores de  $L_{vap,s}$  se obtuvieron con un modelo polinomial que se realizó en Matlab (ANEXO F).

Para conocer el caudal de aire necesario para cubrir esa cantidad de calor necesario para evaporar la salmuera, se hizo uso de la carta psicrométrica (ANEXO B). Se realizaron los cálculos en forma analítica y se comprobaron dichos resultados gráficamente, en condiciones con 0% NaCl.

Los datos que son necesarios para el calentamiento del aire es la temperatura inicial del aire ( $T_{2A}$ ), así como el porcentaje de humedad relativa ( $\%HR_{,2A}$ ). Dichos datos los añadí como celdas que se les puede cambiar su valor (son las celdas rellenas de amarillo en la Figura 3), y los demás parámetros están en función de estos valores.

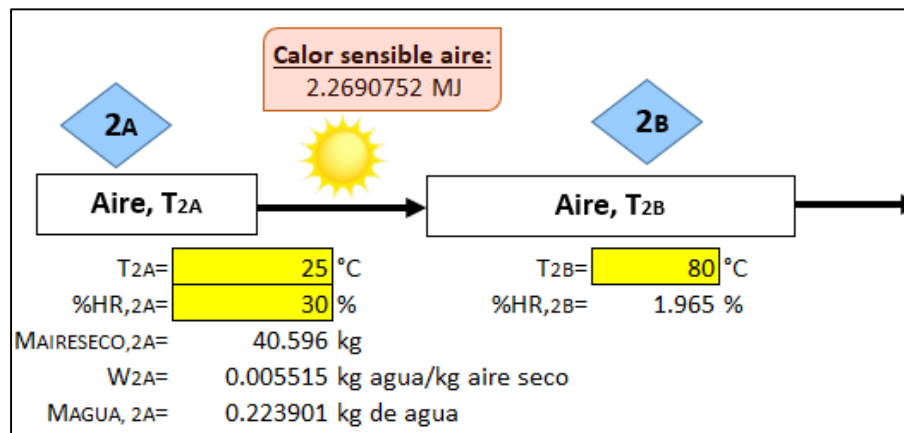
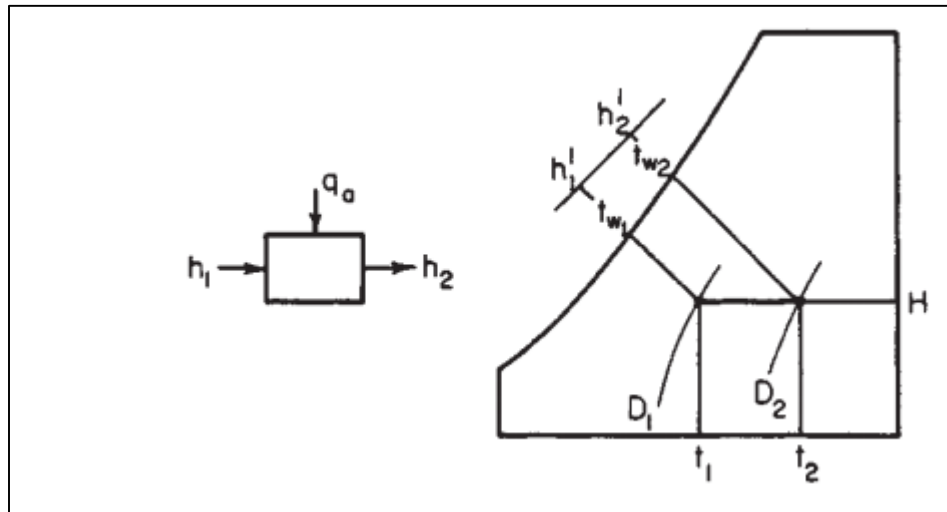


Figura 3. Etapa 2 de la desalinización de la salmuera.

Una vez identificado el punto en la carta psicrométrica, me traslade horizontalmente hacia la derecha, hasta la temperatura final del aire ( $T_{2B}$ ), lo cual significa el calentamiento del aire (Figura 4). El punto final, temperatura final del aire, es la temperatura de entrada del aire al secador por aspersion, el cual, también está señalado como una celda que se le puede cambiar el valor (Figura 3).



**Figura 4.** Diagrama que muestra los parámetros que cambian y los que permanecen constantes en un proceso de calentamiento. "Adaptado de Chemical Engineers Handbook, John H. Perry"

Para conocer los valores en forma analítica, se requiere del valor de la presión de vapor saturado de la salmuera ( $P_{s,vapsat}$ ) el cual está en función de la salinidad de la salmuera y la temperatura, dicho valor está establecido con un modelo polinomial que se encuentra en el ANEXO G.

La presión parcial de vapor se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_{s,vap} = \left( \frac{\%HR_{2i}}{100} \right) * P_{s,vapsat} \quad (3)$$

Donde la presión parcial de vapor ( $P_{s,vap}$ ) y la presión de vapor saturado de la salmuera ( $P_{s,vapsat}$ ) están en unidades de kPa.

Cuando una cantidad de aire se calienta, tiene el mismo valor de humedad absoluta antes del calentamiento y después del calentamiento, es decir, la (4)

cantidad de vapor de agua contenida en una unidad de volumen de aire es igual al inicio y al final del calentamiento. Para obtener la humedad absoluta del aire ( $W_{2A}$ ) se utiliza la siguiente fórmula:

$$W_{2A} = 0.621945 \frac{P_{s,vap}}{P_T - P_{s,vap}}$$

Donde  $P_T$  es la presión total de operación, el cual tiene un valor de 101.325 kPa; y  $P_{s,vap}$  es la presión parcial de vapor.

Por otro lado, durante el calentamiento la humedad relativa cambia, ocurriendo una disminución de la humedad relativa cuando se aumenta la temperatura, es decir, el grado de saturación disminuye; esto sucede porque cuando se aumenta la temperatura, el aire tiene mayor capacidad para contener vapor. Para el cálculo de la humedad relativa ( $\%HR_{,2i}$ ) se considera la Ec. (3).

Además, se realiza el cálculo de la entalpía del aire al inicio del calentamiento ( $h_{aire,2A}$ ) y después del calentamiento ( $h_{aire,2B}$ ) con la siguiente fórmula:

$$h_{aire,2i} = 1.006T_{2i} + W_{2A}(2501 + 1.86T_{2i}) \quad (5)$$

Donde  $i$  significa la condición tanto inicial o final, siendo el valor de  $i = A$  cuando se trata de las condiciones al inicio del calentamiento; e  $i = B$  se refiere al final del calentamiento.

Después, se hace el cálculo del cambio de entalpía ( $\Delta h_{aire}$ ), para conocer la cantidad de energía que se tiene por cada kg de aire seco que entra al sistema, y de esta forma, establecer la cantidad de aire necesario para lograr la evaporación de las gotas de salmuera dentro de la cámara de aspersion. La cantidad de aire seco necesario ( $M_{AIRESECO,2A}$ ), se obtiene dividiendo el calor que necesita tener el aire para evaporar la salmuera ( $Q_{latente,s}$ ) entre el calor que me da 1 kg de aire seco ( $\Delta h_{aire}$ ).

$$\Delta h_{aire} = h_{aire,2B} - h_{aire,2A} \quad (6)$$

### 2.2.7. Etapa 3: Obtención de la sal

La masa húmeda total de sal que se obtiene después del secado ( $M_3$ ), depende del porcentaje de humedad que se quiere que tenga la sal ( $\%H_{SAL}$ ). La fórmula que enlaza las anteriores variables es:

$$M_3 = \left( \frac{\%H_{SAL}}{100} \right) M_{seco,3} + M_{seco,3} \quad (7)$$

La masa seca de sal ( $M_{seco,3}$ ) se obtiene con la densidad de la salmuera.

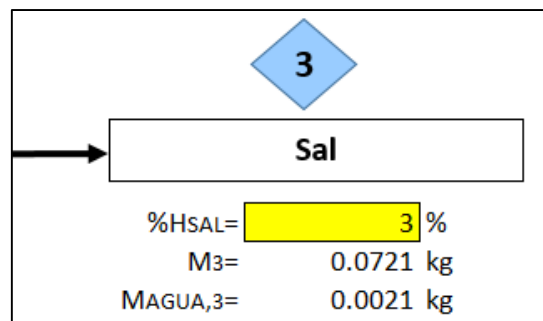
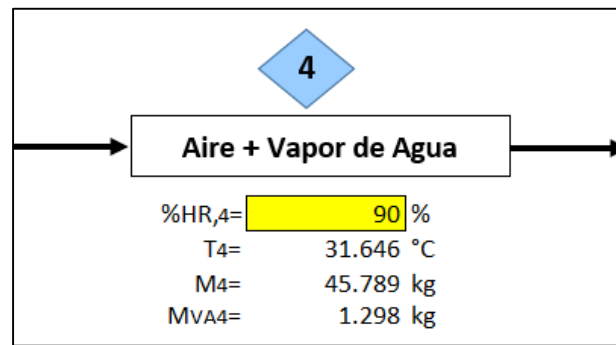


Figura 5. Etapa 3 de la desalinización de la salmuera.

### 2.2.8. Etapa 4: Condiciones de aire y vapor de agua a la salida del secador por aspersion

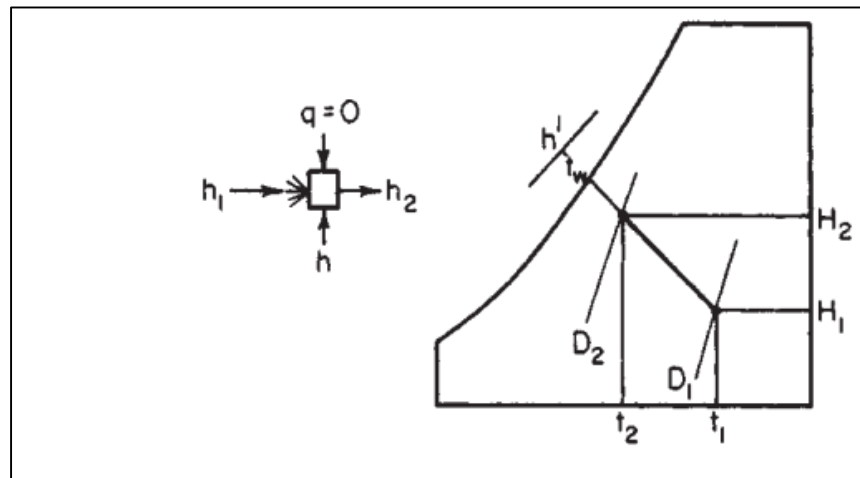
En esta etapa, es importante determinar la temperatura a la que sale el aire húmedo del secador por aspersion ( $T_4$ ). Para esto, se resuelve una ecuación de cuarto grado utilizando métodos numéricos. El porcentaje de humedad relativa del aire húmedo a la salida del secador por aspersion ( $\%HR_{,4}$ ) se acerca al porcentaje de saturación, y en el simulador se establece como una celda que se le puede cambiar el valor (celda rellena de color amarillo de la Figura 6). Por otro lado, el valor de la masa del aire húmedo ( $M_4$ ) y la masa del vapor de agua ( $M_{VA4}$ ) a la salida del secador, se obtienen realizando un balance de masa general en el secador por aspersion, lo cual será descrito más adelante.



**Figura 6.** Etapa 4 de la desalinización de la salmuera.

Para las condiciones de la Etapa 4, se tendrán nuevos valores de presión de saturación y presión parcial de vapor, porque dichos valores dependen de la temperatura, y resulta que la temperatura es el valor que se quiere conocer en este punto, así que la ecuación que se resolverá estará compuesta por los coeficientes de la presión de vapor saturado que están descritos en el ANEXO H, considerando que en este punto no hay cantidad de NaCl contenido en el aire húmedo de salida del secador por aspersion.

Gráficamente, cuando ocurre un secado, permanece constante la entalpía, es decir, me muevo diagonalmente por la línea de entalpía hacia la saturación, hasta llegar al respectivo porcentaje de humedad relativa que se establece en este etapa (Figura 7).



**Figura 7.** Diagrama que muestra los parámetros que cambian y los que permanecen constantes en un proceso de secado. "Adaptado de Chemical Engineers Handbook, John H. Perry"

De esta manera, para obtener un valor analítico de la temperatura, se utiliza la Ec. (5), cambiando los subíndices a:

$$h_{aire,2i} = h_{aire,4} \quad (8)$$

$$T_{2i} = T_4 \quad (9)$$

$$W_{2A} = W_4 \quad (10)$$

El valor de la entalpía a la entrada del secador ( $h_{aire,2i}$ ) y a la salida del secador ( $h_{aire,4}$ ) es el mismo, la temperatura de salida del aire húmedo ( $T_4$ ) es la incognita, y la humedad absoluta del aire a la salida del secador se pone en función de la temperatura de acuerdo a la Ec. (3) y (4), quedando la ecuación de cuarto grado a resolver de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \frac{1.006\%HR_{,4}}{100} (aT_4^4) - \left( \frac{0.621945\%HR_{,4}}{100} \right) (1.86aT_4^4) - \frac{h_{aire,4}\%HR_{,4}}{100} (aT_4^3) \\ & + \frac{1.006\%HR_{,4}}{100} (bT_4^3) - (2501 * 0.621945) \frac{\%HR_{,4}}{100} (aT_4^3) \\ & - \left( \frac{0.621945\%HR_{,4}}{100} \right) (1.86bT_4^3) - \frac{h_{aire,4}\%HR_{,4}}{100} (bT_4^2) \\ & + \frac{1.006\%HR_{,4}}{100} (cT_4^2) - (2501 * 0.621945) \frac{\%HR_{,4}}{100} (bT_4^2) \\ & - \left( \frac{0.621945\%HR_{,4}}{100} \right) (1.86cT_4^2) - \frac{h_{aire,4}\%HR_{,4}}{100} (cT_4) - 1.006(P_T T_4) \\ & + \frac{1.006\%HR_{,4}}{100} (dT_4) - (2501 * 0.621945) \frac{\%HR_{,4}}{100} (cT_4) \\ & - \left( \frac{0.621945\%HR_{,4}}{100} \right) (1.86dT_4) + h_{aire,4} P_T - h_{aire,4} \frac{\%HR_{,4}}{100} d \\ & - (2501 * 0.621945) \frac{\%HR_{,4}}{100} d = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

donde  $a, b, c, y d$  son los coeficientes de la ecuación de tercer grado que se ajusta a los valores de la presión vapor de saturación del agua a diferentes temperaturas sin contenido de sal, la cual esta representada en el ANEXO H.

De las raíces obtenidas, se selecciona aquella que sea real y positiva. Dicho valor será el valor de la temperatura del aire húmedo a la salida del secador por aspersion. El

resultado se obtuvo utilizando un método llamado algoritmo de diferencia del cociente, el cual determina todas las raíces, ya sea reales o complejas, sin necesidad de comenzar con un valor inicial, realizando una serie de operaciones con los coeficientes de la ecuación, y por consiguiente, determinar las raíces utilizando dos veces la fórmula general de segundo grado. Además, se utilizó el Complemento “Solver” de Excel para validar el resultado de la temperatura que se obtenía por el método algoritmo de diferencia del cociente, adquiriendo el mismo resultado con ambas técnicas.

Una vez teniedo la temperatura  $T_4$ , es posible obtener el nuevo valor de la presión parcial de vapor ( $P_{w,4}$ ), presión de saturación ( $P_{w,sat,4}$ ), así como el valor de la humedad absoluta  $W_4$ .

### 2.2.9. Etapa 5: Obtención del agua condensada

El proceso de condensación consiste en obtener líquido condensado a partir de un vapor, con la ayuda del contacto con un fluido que toma todo el calor necesario para llevar a cabo el cambio de fase. En este caso, tenemos una corriente de aire húmedo, y solamente consideraremos el vapor de agua que lo contiene, el cual estará en contacto con agua de mar para poder obtener un agua condensada.

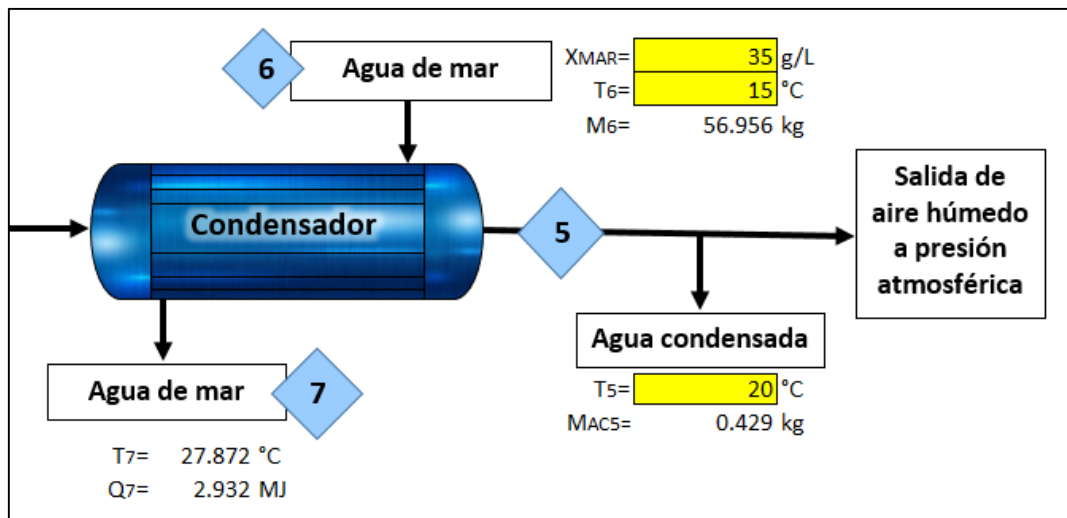
Para conocer la cantidad de agua condensada obtenida al final del proceso de condensación, se debe de conocer la diferencia de humedad absoluta que se tiene al inicio y al final de la condensación, de esta manera, conoceremos los kg de agua condensada que se podrá obtener.

Primeramente, se calculará la temperatura a la que se obtiene la primera gota, conocida como la temperatura de rocío. La fórmula para calcular la temperatura de rocío ( $T_w$ ) incluye un rango de 0-93°C:

$$T_w = C_{14} + C_{15}\alpha + C_{16}\alpha^2 + C_{17}\alpha^3 + C_{18}(P_{w,4})^{0.1984} \quad (12)$$

Donde  $C_{14} = 6.54$  ,  $C_{15} = 14.526$  ,  $C_{16} = 0.7389$  ,  $C_{17} = 0.09486$  ,  $C_{18} = 0.4569$  ,  $\alpha = \ln(P_{w,4})$  y  $P_{w,4}$  es la presión parcial del vapor de agua en kPa a las condiciones de entrada al condensador.

Por consiguiente, se establece la temperatura de salida a la que se pretende que salgan el agua condensada, aire y el vapor perdido (Figura 8). En este punto, cambiarán los valores de presión de vapor saturado, obteniéndose con el nuevo valor a la temperatura  $T_5$ . Además, la presión parcial del vapor de agua ( $P_{w,5}$ ) se igualará al valor de la presión de vapor saturado del vapor de agua ( $P_{w,sat,5}$ ), esto debido a que estamos en un proceso de condensación lo cual hace que se trabaje en la línea de saturación de la carta psicrométrica, es decir, en la línea donde el porcentaje de humedad relativa es igual a 100%. Con éstos nuevos valores se calcula la nueva humedad absoluta ( $W_5$ ) utilizando la Ec. (4).



**Figura 8.** Diagrama incluyendo la Etapa 5 del proceso de desalinización de la salmuera.

Gráficamente, para llegar a esa línea de saturación, parto del punto donde me quede a la temperatura ( $T_4$ ) y porcentaje de humedad relativa ( $\%HR_{,4}$ ) en la etapa 4, de ahí me traslado horizontalmente hacia la izquierda hasta llegar a la línea de saturación. Una vez llegando a la línea de saturación, me muevo sobre esa línea hasta la temperatura  $T_5$ . En ese punto, hacia la derecha se toma el valor de la humedad absoluta ( $W_5$ ).

Para obtener la diferencia de humedad absoluta, utilizó la siguiente fórmula:

$$\Delta W_{5-4} = W_5 - W_4 \quad (13)$$



Ese resultado me dará los kilogramos de agua que se condensan, por cada kilogramo de aire seco que sale del condensador. La cantidad de aire seco que sale del condensador, es el mismo valor que a la entrada del condensador y que a la entrada del secador por aspersion, debido a que este fluido solamente se utilizó para que ocurriera el cambio de fase de la salmuera dentro de la cámara del secador. Dicho valor es igual a  $M_{AIRESECO,2A}$ .

### 2.2.10. Etapa 6: Obtención del flujo de entrada del refrigerante en el condensador

Para obtener la cantidad de flujo de refrigerante necesario para condensar el vapor de agua, se requiere realizar un balance de masa y energía. Primeramente, se establecen las variables de acuerdo a la Figura 9 que describe cada uno de los flujos que son necesarios considerar.

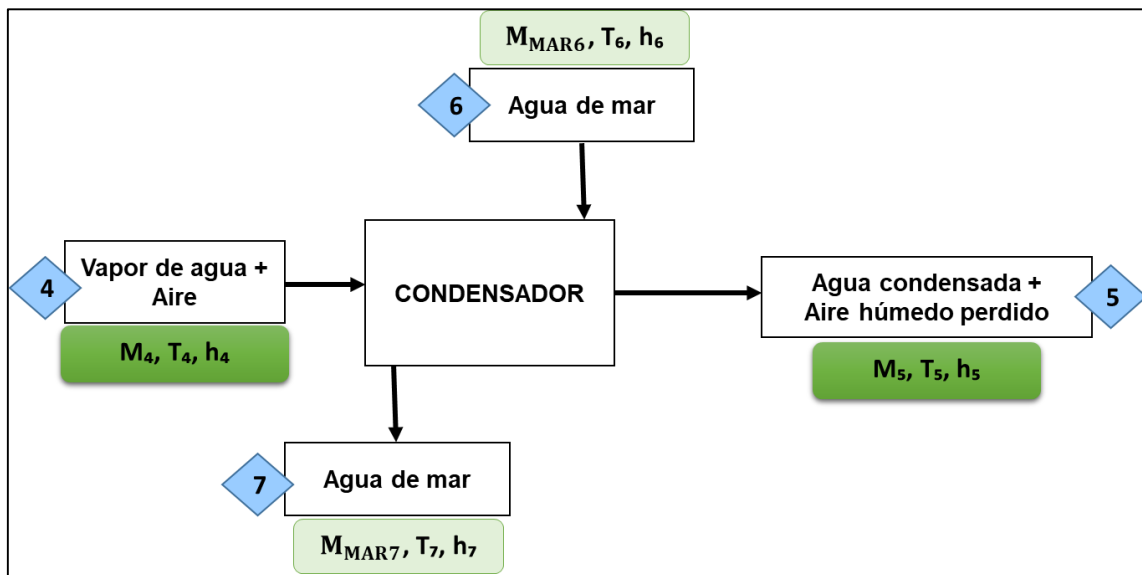


Figura 9. Diagrama de la composición de los flujos de entrada y salida en el condensador.

El balance de masa es el siguiente:

$$\text{Entrada de materia} = \text{Salida de materia} \quad (14)$$

$$M_4 + M_{MAR,6} = M_5 + M_{MAR,7} \quad (15)$$

El flujo  $M_4$  al entrar al condensador está compuesto por aire seco y vapor de agua:

$$M_4 = M_{AIRESECO,4} + M_{VAPOR\ DE\ AGUA,4} = M_{AIRESECO,4} + M_{VA,4} \quad (16)$$

El flujo de entrada del agua de mar ( $M_{MAR,6}$ ) al condensador es igual al flujo de salida ( $M_{MAR,7}$ ):

$$M_{MAR} = M_{MAR,6} = M_{MAR,7} \quad (17)$$

El flujo  $M_5$  al entrar al condensador está compuesto por agua condensada, aire seco y vapor de agua:

$$\begin{aligned} M_5 &= M_{VAPOR\ PERDIDO,5} + M_{AGUA\ CONDENSADA,5} + M_{AIRESECO,perdido} \\ &= M_{VP,5} + M_{AC,5} + M_{AIRESECO,perdido} \end{aligned} \quad (18)$$

Sustituyendo Ec. (16), (17) y (18) en (15), queda:

$$M_{AIRESECO,4} + M_{VA,4} + M_{MAR} = M_{VP,5} + M_{AC,5} + M_{AIRESECO,perdido} + M_{MAR} \quad (19)$$

El balance de energía es el siguiente:

$$\text{Entrada de energía} = \text{Salida de energía} \quad (20)$$

$$\sum_{out} \dot{m}_{out} h_{out} = \sum_{in} \dot{m}_{in} h_{in} \quad (21)$$

$$M_{VA,4} h_{VA,4} + M_{MAR,6} h_{MAR,6} = M_{AC,5} h_{AC,5} + M_{VP,5} h_{VP,5} + M_{MAR,7} h_{MAR,7} \quad (22)$$

Despejando  $M_{MAR}$  en la Ec. (22):

$$M_{MAR} = \frac{M_{AC,5} h_{AC,5} + M_{VP,5} h_{VP,5} - M_{VA,4} h_{VA,4}}{(h_{MAR,6} - h_{MAR,7})} \quad (23)$$

El balance de energía en el intercambiador de calor entre el vapor a condensar y el refrigerante, es el siguiente:

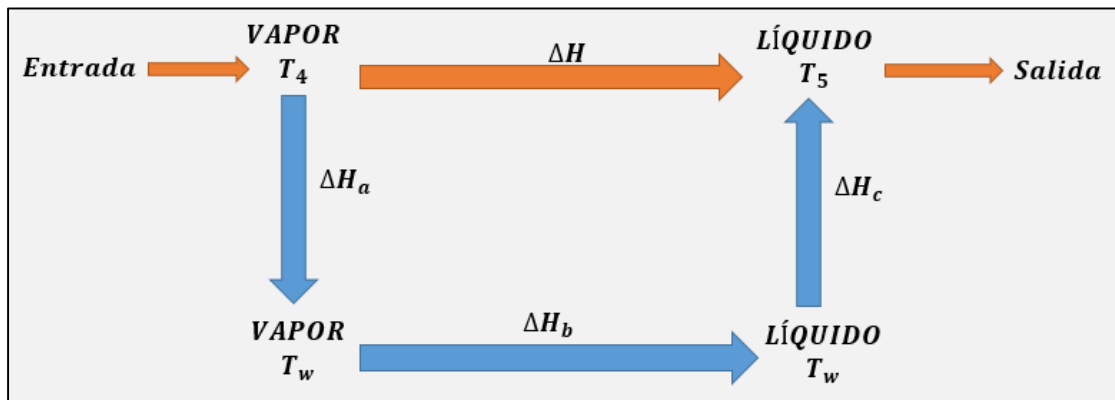
$$\dot{Q}_{\text{ganado por el agua de mar}} = \dot{Q}_{\text{perdido por el vapor de agua}} \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{\text{ganado por el agua de mar}} = \dot{m}C_p\Delta T = M_{\text{MAR}}\bar{C}_{p\text{MAR}}(T_7 - T_6) \quad (25)$$

Sustituyendo la Ec. (23) en la (25), obtengo:

$$\dot{Q}_{\text{ganado por el agua de mar}} = \left[ \frac{M_{AC,5}h_{AC,5} + M_{VP,5}h_{VP,5} - M_{VA,4}h_{VA,4}}{(h_{MAR,6} - h_{MAR,7})} \right] \bar{C}_{p\text{MAR}}(T_7 - T_6) \quad (26)$$

Para obtener el calor ganado por el agua de mar ( $\dot{Q}_{\text{ganado por el agua de mar}}$ ) se debe considerar el total de entalpías que hay en un proceso de condensación, tal como se describe en la Figura 10.



**Figura 10.** Diagrama que muestra los cambios de entalpías que hay que considerar en un cambio de fase de vapor a líquido (condensación).

La temperatura a la que ocurre el cambio de fase, es la temperatura  $T_w$  que se obtuvo haciendo uso de la Ec. (12). El total de las entalpías se aplica utilizando la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} Q = \Delta H &= \Delta H_a + \Delta H_b + \Delta H_c = \text{Calor sensible } a + \text{Calor latente } b + \text{Calor sensible } c \\ &= (h_{VA,w} - h_{VA,4}) + (h_{LÍQ,w} - h_{VA,w}) + (h_{LÍQ,5} - h_{LÍQ,w}) \end{aligned} \quad (27)$$

Es muy importante determinar las entalpías en su fase y temperatura correspondiente. El valor de la entalpía del vapor saturado de agua, el calor latente de vaporización, la entalpía del agua en fase líquida y la entalpía del agua de mar se obtuvieron haciendo

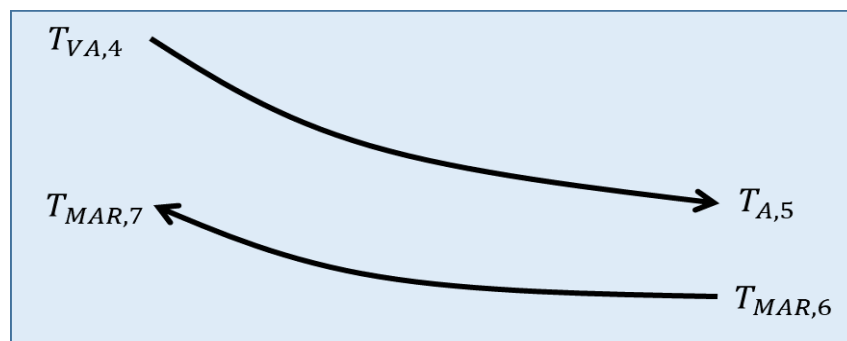
uso de una ecuación que se ajusta a la curva correspondiente en cada caso, que se encuentran en el ANEXO I, ANEXO J, ANEXO K y ANEXO L, respectivamente. Como los resultados de las entalpías están en unidades kcal/kg, se convertirá todo a kJ/kg con la siguiente relación: 1 kcal = 4.184 kJ.

### 2.2.11. Etapa 7: Obtención de la temperatura de salida del refrigerante en el condensador

Teniendo los datos y las fórmulas que enlazan los parámetros de la Ec. (26), se reacomoda la ecuación teniendo como incógnita la temperatura  $T_7$  en los dos lados de la ecuación, para hacer uso del Complemento “Solver” de Excel.

Una vez teniendo el resultado de la temperatura  $T_7$ , se calcula el valor del flujo de agua de mar necesario despejando  $M_{MAR}$  de la Ec. (25). Después, se establece un rango de temperatura adecuada para la entrada y la salida del agua del mar, en base a lo anterior se obtiene una relación que me indica la cantidad necesaria de agua de mar por cada 1.25 kg de vapor de agua que se añaden a la entrada del condensador.

Hay que tener en consideración que se trata de un condensador en contraflujo y se debe de cumplir las distribuciones de temperatura que se muestran en la Figura 11. Además, es importante tener presente que, “en un arreglo en contraflujo, la temperatura de salida del fluido frío puede exceder la temperatura de salida del fluido caliente” (Incropera & DeWitt, 1999).



**Figura 11.** Distribuciones de temperatura para un intercambiador de calor en contraflujo, adecuando la nomenclatura al sistema de estudio.

### 2.3. Suposiciones

Se hizo uso de las siguientes suposiciones para el desarrollo del modelo matemático:

1. Las pérdidas de calor al ambiente y/o alrededores son despreciables.
2. Los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes.
3. El vapor no contiene sal (está libre de sal).
4. No hay sub enfriamiento del condensado que sale del sistema.

### 2.4. Balance de masa por componente

Balance de masa de agua en el secador por aspersión:

$$M_{AGUA,1B} + M_{AGUA,2A} = M_{VA,4} + M_{AGUA,3} \quad (28)$$

Balance de masa de agua en el condensador:

$$M_{VA4} = M_{AC5} + M_{VP5} \quad (29)$$

Balance de masa de sal en el secador por aspersión:

$$M_{SAL,1} = M_{SAL,3} \quad (30)$$

Balance de masa de aire seco en el secador por aspersión:

$$M_{AIRESECO,2A} = M_{AIRESECO,4} \quad (31)$$

Balance de masa de aire seco en el condensador:

$$M_{AIRESECO,4} = M_{AIRESECO,perdido} \quad (32)$$

### 3.5. Comportamiento de la temperatura en cada una de las etapas del proceso de desalinización

Inicialmente, la temperatura del aire atmosférico ( $T_{2A}$ ) y de la salmuera ( $T_{1A}$ ) se encontrarán en condiciones ambientales. Después los fluidos serán sometidos a un calentamiento por medio de un sistema térmico solar alcanzado temperaturas  $T_{2B}$  y  $T_{1B}$ , respectivamente. La temperatura del aire ( $T_{2B}$ ) sobrepasará por unos grados a la temperatura de la salmuera ( $T_{1B}$ ), porque el aire es el que se encargará de la transferencia de masa y calor dentro de la cámara del secador por aspersion, así que requiere de más energía para poder realizar dicha transferencia. Cuando dichos fluidos entran en contacto dentro de la cámara de aspersion, las gotas de la salmuera se evaporarán y el agua contenida en esas gotas de salmuera, así como el agua que contenía el aire de entrada al secador, saldrán por la parte superior del secador a una temperatura  $T_4$ . Finalmente, el aire húmedo que contiene vapor de agua dentro de ese volumen se pondrá en contacto con el agua de mar dentro de un sistema de condensación, y el agua condensada obtenida saldrá a una temperatura  $T_5$ . El anterior comportamiento se muestra en la Figura 12.

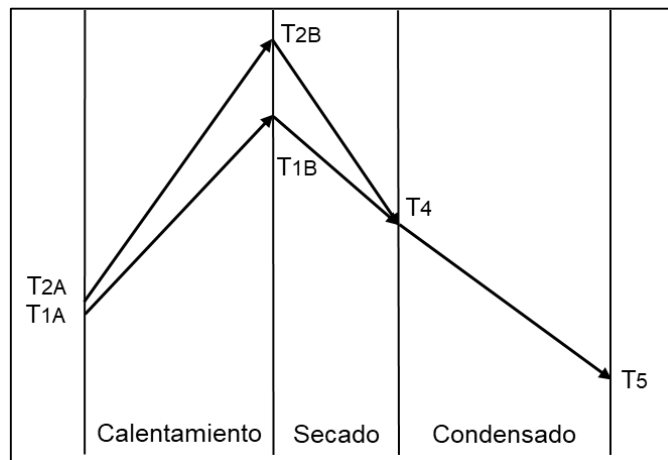


Figura 12. Esquema representando el perfil de temperatura del sistema.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se establecieron los balances de materia y energía para el secado por aspersión de la salmuera y para el condensado del vapor de agua obtenida después del secado. Siguiendo la metodología propuesta y llevando a cabo cada una de las etapas descritas con anterioridad, se obtuvo un simulador termodinámico y másico completo que nos permitió realizar un análisis de cinco casos de estudio, los cuales, se describen a continuación.

#### 4.1. Caso 1. Variación de la temperatura del aire a la entrada del secador

Para la variación de la temperatura del aire a la entrada del secador por aspersión, se establecieron valores de entrada a algunos parámetros (Tabla 1).

**Tabla 1.** Valores de los parámetros de entrada del Caso 1.

#### VALORES DE PARAMETROS DE ENTRADA

$T_{1A}$	=	25	°C
$M_{1A}$	=	1	Litros
$T_{1B}$	=	60	°C
$X_1$	=	70	g/L
$T_{2A}$	=	25	°C
$\%HR_{,2A}$	=	30	%
$\%HSAL$	=	3	%
$\%HR_{,4}$	=	90	%
$T_5$	=	20	°C
$X_{MAR}$	=	35	g/L
$T_6$	=	15	°C

Para el análisis, se tomó como valor máximo 120 °C y un mínimo de 60 °C, variando temperatura de entrada del aire cada 10 °C. Se obtuvieron resultados de la Tabla 2 y 3, los cuales muestran los resultados de algunos parámetros en el que no se tuvo una variación de su valor y resultados en los que el parámetro mostró variación, respectivamente.

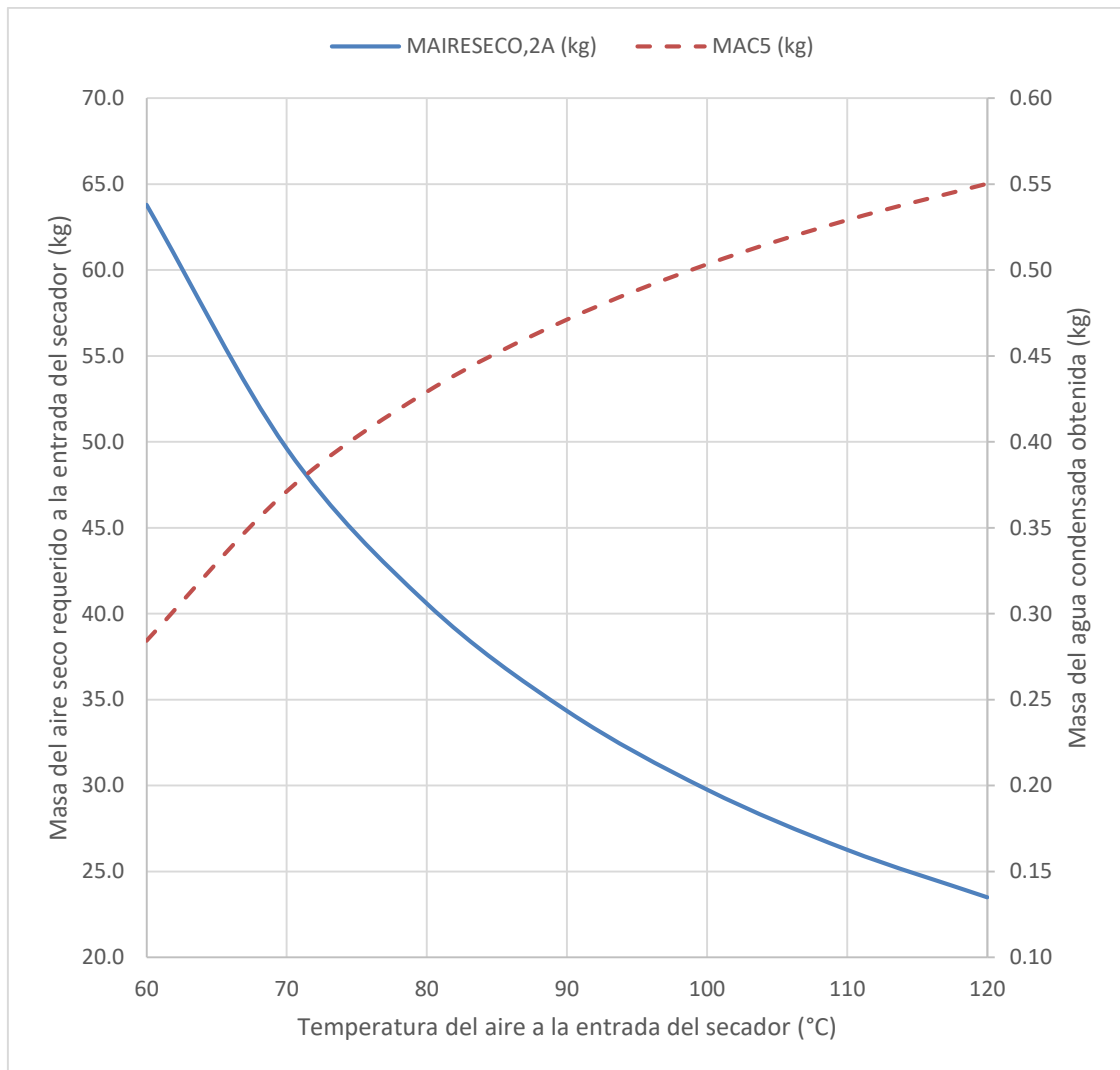
**Tabla 2.** Resultados fijos obtenidos al variar la temperatura del aire a la entrada del secador por aspersión.

Parámetro	Valor fijo obtenido
<b>MAGUA,1B (kg)</b>	0.9648
<b>QSDRY (MJ)</b>	2.4083
<b>QSDRY/MA1 (MJ/litro salmuera)</b>	2.4083
<b>M3 (kg)</b>	0.0721

**Tabla 3.** Resultados obtenidos al cambiar la temperatura del aire a la entrada del secador por aspersión.

T2B (°C)	MAIRESECO,2A (kg)	MVA4 (kg)	MAC5 (kg)	Q7 (MJ)	QSDRY/MAC5 (MJ/kg agua)	MAC5/MVA4 (kg agua condensada/kg agua total)	MAC5/MAGUA,1B (kg agua condensada/kg agua en la salmuera)
60	63.7935	1.3145	0.2843	3.2376	8.4715	0.2163	0.2947
70	49.6172	1.2363	0.3712	3.0504	6.4886	0.3002	0.3847
80	40.5959	1.1866	0.4291	2.9321	5.6123	0.3616	0.4448
90	34.3504	1.1521	0.4711	2.8510	5.1121	0.4089	0.4883
100	29.7703	1.1269	0.5033	2.7920	4.7852	0.4466	0.5217
110	26.2679	1.1076	0.5290	2.7474	4.5527	0.4776	0.5483
120	23.5029	1.0923	0.5502	2.7126	4.3774	0.5037	0.5703





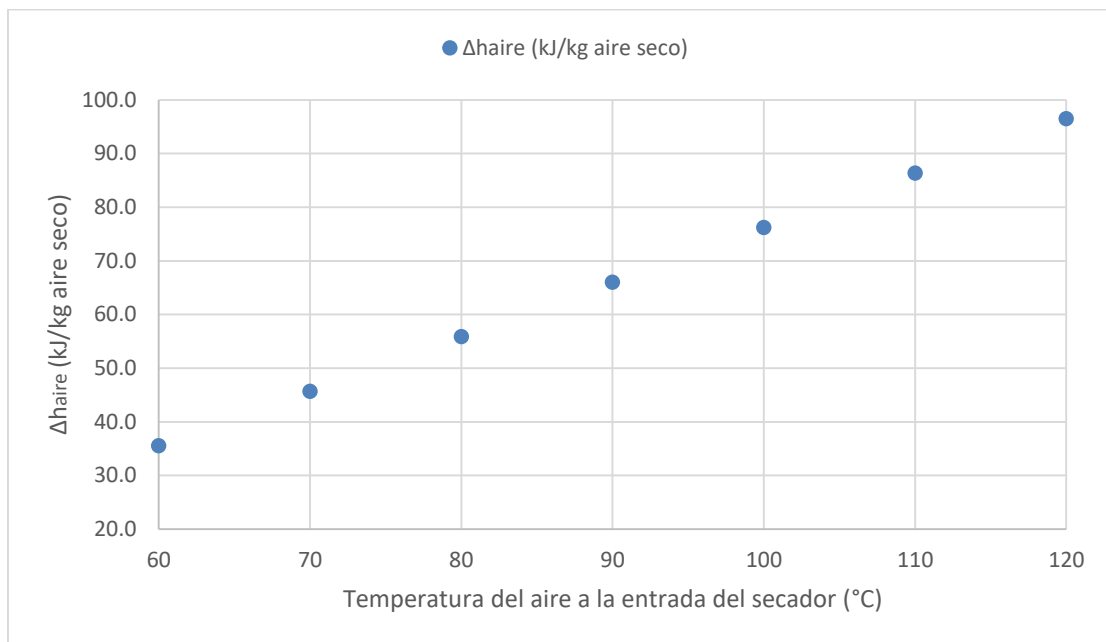
**Figura 13.** Efecto de la temperatura del aire en la masa del aire seco requerido a la entrada del secador y en la masa de agua condensada obtenida.

En la figura 13 se puede apreciar que la masa del aire seco requerido a la entrada del secador por aspersión va disminuyendo conforme la temperatura de entrada del aire seco va aumentando, es decir, mientras más alta es la temperatura del aire a la entrada del secador, menos cantidad de masa de ese aire se requiere para llevar a cabo la transferencia de masa y calor dentro de la cámara del secado. Esto se debe a que mientras más alta sea la temperatura al que se llegue el calentamiento del aire, más energía contiene esa cantidad de aire; esa es la energía que se pondrá en contacto con las gotas de salmuera dentro de la cámara de aspersión. Lo anterior, hace establecer

que la temperatura del aire es proporcional a la entalpía. Además, se realizó un análisis con las mismas condiciones de la Tabla 1 para mostrar los valores de entalpía correspondiente a diferentes valores de la temperatura de aire, y observar el comportamiento antes descrito (Tabla 4 y Figura 14).

**Tabla 4.** Valores de la entalpía que se tiene antes y después del calentamiento del aire seco a diferentes temperaturas.

T <sub>2B</sub> (°C)	h <sub>aire,2A</sub> (kJ/kg aire seco)	h <sub>aire,2B</sub> (kJ/kg aire seco)	Δh <sub>aire</sub> (kJ/kg aire seco)
60	39.200	74.769	35.569
70	39.200	84.932	45.732
80	39.200	95.095	55.894
90	39.200	105.257	66.057
100	39.200	115.420	76.219
110	39.200	125.582	86.382
120	39.200	135.745	96.545

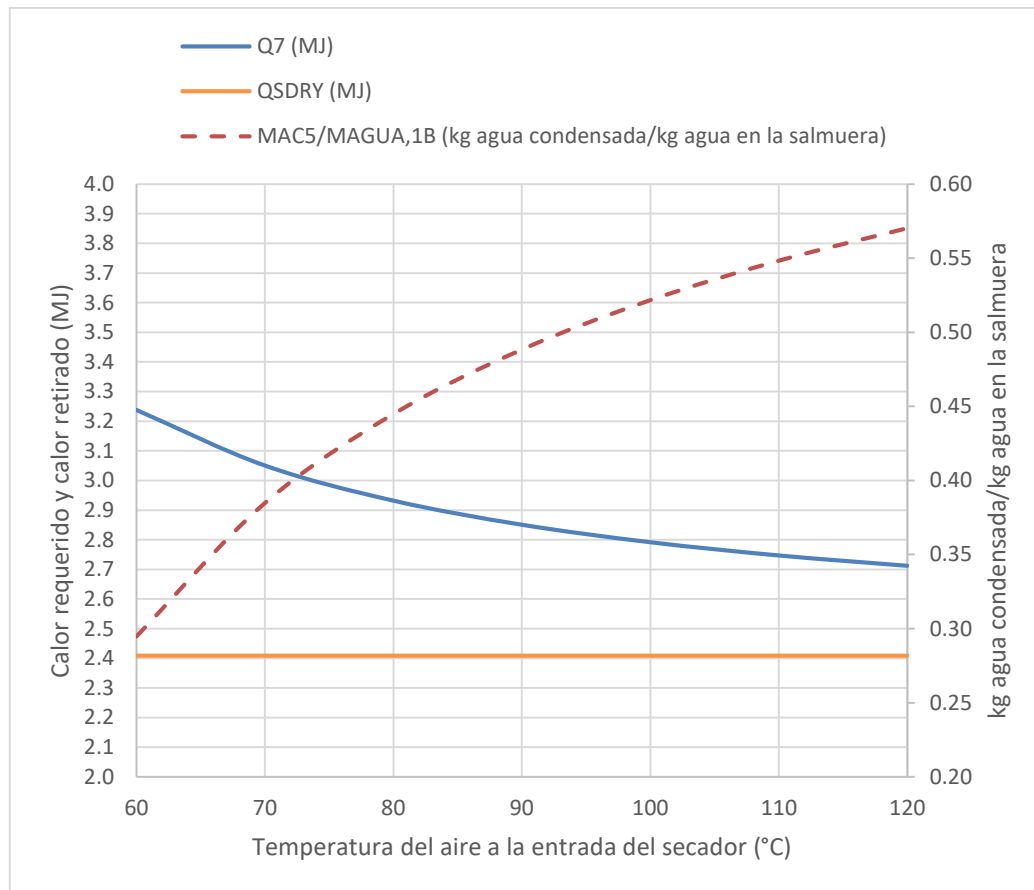


**Figura 14.** Efecto de la temperatura del aire a la entrada del secador a diferentes valores del cambio de entalpía, antes y después del calentamiento del fluido

Otro dato importante de la Figura 13, es que la masa de agua condensada obtenida (MAC5) va aumentando conforme la temperatura del aire a la entrada del secador también aumenta. La pregunta es: ¿Cómo sucede ese aumento de la cantidad de agua condensada obtenida si el comportamiento del aire seco está en descenso conforme la temperatura del aire a la entrada del secador está aumentando? Como primera instancia, se pudiera imaginar que se tendría que tener una disminución de la cantidad de agua condensada (MAC5) porque el aire seco también está disminuyendo y como el aire seco contiene una cierta cantidad de vapor de agua, también se aprovecha para condensarse. Pero no sucede así, de hecho, como el proceso está dividido en varias etapas, cuando sale la mezcla de aire seco con el vapor de agua del secador (Línea 4), sí ocurre esa disminución, pero en la cantidad de vapor de agua que sale del secador (MVA4), lo cual se puede apreciar en la Tabla 5 en la columna MVA4. Después de esa etapa, continua la condensación de esa mezcla, es aquí donde la temperatura a la que sale la mezcla del secador por aspersion toma un papel muy importante, lo cual está relacionado con la cantidad de agua condensada que se obtiene. Mientras más alta es la temperatura del aire seco a la entrada del secador (T2B), más alta será la temperatura de salida de la mezcla de aire seco más vapor de agua (Ver columna T4, Tabla 5). Por lo que, si la temperatura T4 es más alta, se obtendrá mayor cantidad de agua condensada porque habrá mayor transferencia de calor dentro del condensador y, por ende, habrá más cantidad de masa que tendrá un cambio de fase. Esto significa que el condensador tendrá más capacidad para hacer el cambio de fase con la interacción-contacto del agua de mar, al contar con una alta temperatura de entrada del vapor de agua.

**Tabla 5.** Comportamiento de la temperatura de la mezcla de aire seco más vapor de agua en la salida del secador por aspersion.

<b>T2B (°C)</b>	<b>MVA4 (kg)</b>	<b>T4 (°C)</b>	<b>MAC5 (kg)</b>
<b>60</b>	1.3145	25.98	0.2843
<b>70</b>	1.2363	28.40	0.3712
<b>80</b>	1.1866	30.58	0.4291
<b>90</b>	1.1521	32.57	0.4711
<b>100</b>	1.1269	34.38	0.5033
<b>110</b>	1.1076	36.06	0.5290
<b>120</b>	1.0923	37.62	0.5502



**Figura 15.** Efecto de la temperatura del aire a la entrada del secador con respecto al calor requerido por el secador por aspersión, el calor retirado por el agua de mar en el condensador y con respecto al rendimiento de obtención de agua potable.

En la Figura 15 se puede apreciar, primeramente, que el calor requerido por el sistema para procesar la salmuera ( $Q_{SDRY}$ ) se mantiene constante conforme la temperatura del aire a la entrada del secador va aumentando. Por otro lado, se observa que el calor que retira el agua del mar al vapor de agua para llevar a cabo la condensación ( $Q_7$ ), va disminuyendo conforme la temperatura del aire a la entrada del secador va aumentando. Además, el rendimiento de obtención de agua potable está definido como la razón de los kg del agua condensada obtenida entre los kg de agua que contiene la salmuera a la entrada del proceso de secado ( $MAC5/MAGUA,1B$ ). Dicho rendimiento aumenta conforme la temperatura del aire a la entrada del secador aumenta también.

El calor requerido por el sistema de secado para procesar la salmuera ( $Q_{SDRY}$ ), en el simulador que se desarrolló, no se realizó con una dependencia con las condiciones del

aire, sino con respecto a las condiciones de la salmuera, es por esta razón que se muestra constante éste parámetro cuando se realiza el cambio de la temperatura del aire de entrada al secador.

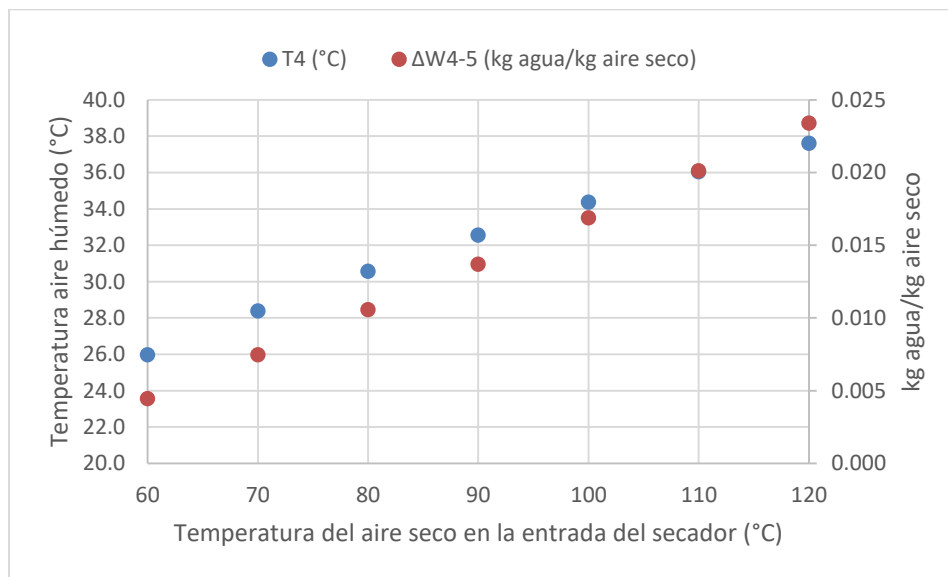
El calor que retira el agua de mar al vapor de agua en la etapa de condensación ( $Q_7$ ), está en función de la masa que entra al condensador y de la suma de las entalpías que ocurren en la condensación (Figura 10). Si se está obteniendo mayor cantidad de agua condensada, se pensaría que el condensador está retirando más calor, pero en este caso, ocurre lo contrario: el condensador retira menos calor. Esto tiene que ver con la relación significativa que tiene la masa que entra al condensador. Como se observó en la Figura 13, la cantidad de aire seco requerido a la entrada del secador disminuye conforme la temperatura del aire en la entrada del secador va aumentando, y como en esa cantidad de aire de entrada hay un contenido de vapor de agua (por el porcentaje de humedad relativa del aire), hace que el vapor de agua a la salida del secador también disminuya (Ver columna  $Mv_4$ , Tabla 5). Por otro lado, la suma de las entalpías no tiene un impacto tan grande como lo es la masa que entra al condensador. Es por esto, que se puede observar el comportamiento de disminución del calor del condensado.

El rendimiento de obtención de agua potable aumenta conforme la temperatura del aire a la entrada del secador aumenta también, es decir, se obtiene más cantidad de agua condensada al trabajar con altas temperaturas en el aire de entrada del secador. El aumento de la cantidad de agua condensada es debido a la diferencia de humedad absoluta que se tiene a la entrada y a la salida del condensador. Esto quiere decir que, se tiene mayor cantidad de humedad absoluta (kg agua/kg aire seco) conforme aumenta la temperatura del aire a la entrada del secador. Esta cantidad de humedad absoluta depende de la temperatura ( $T_4$ ) y del porcentaje de humedad relativa del aire húmedo que sale del secador por aspersion ( $\%HR_4$ ). En el simulador, el porcentaje de humedad relativa del aire se mantiene fijo, pero la temperatura de la mezcla de aire y vapor de agua que salen del secador muestran un cambio en su valor. Como se mencionó anteriormente, la temperatura del aire a la salida del secador por aspersion ( $T_4$ ) aumenta conforme la temperatura del aire a la entrada del secador por aspersion va aumentando y, por ende, se obtendría mayor cantidad de humedad absoluta en ese mismo punto 4 ( $W_4$ ). La humedad absoluta a la salida del condensador ( $W_5$ ) se mantiene constante,

porque en el simulador se mantiene fijo el valor de la temperatura de salida del agua condensada ( $T_5$ ) a  $20^{\circ}\text{C}$ , así que siempre se llegaría a ese valor de temperatura, por lo que, cuando se calcula la diferencia de humedad absoluta entre la entrada y la salida del condensador ( $\Delta W_{4-5}$ ) se obtiene un aumento de los kg de agua obtenida por cada kg de aire seco que entra.

**Tabla 6.** Valores de la masa de vapor de agua obtenida y su temperatura después del proceso de secado, así como los valores de la humedad absoluta en el punto 4 y 5 del proceso, a diferentes temperaturas del aire seco de entrada al secador.

$T_{2B}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	MVA4 (kg)	$T_4$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	W4 (kg agua/kg aire seco)	W5 (kg agua/kg aire seco)	$\Delta W_{4-5}$ (kg agua/kg aire seco)
60	1.315	25.981	0.0192	0.0147	0.0045
70	1.236	28.400	0.0222	0.0147	0.0075
80	1.187	30.582	0.0253	0.0147	0.0106
90	1.152	32.565	0.0284	0.0147	0.0137
100	1.127	34.383	0.0316	0.0147	0.0169
110	1.108	36.060	0.0348	0.0147	0.0201
120	1.092	37.616	0.0381	0.0147	0.0234



**Figura 16.** Efecto de la temperatura del aire seco en la entrada del secador con respecto a la temperatura del aire en la etapa 4 del proceso y en la diferencia de humedad absoluta entre la etapa 4 y 5.

## 4.2. Caso 2. Variación de la temperatura de la salmuera a la entrada del secador

Para la variación de la temperatura de la salmuera a la entrada del secador por aspersión, se establecieron valores de entrada en algunos parámetros (Tabla 7).

**Tabla 7.** Valor de los parámetros de entrada del Caso 2.

<b>VALORES DE PARAMETROS DE ENTRADA</b>	
T <sub>1A</sub> =	25 °C
M <sub>1A</sub> =	1 Litros
X <sub>1</sub> =	70 g/L
T <sub>2A</sub> =	25 °C
T <sub>2B</sub> =	80 °C
%HR, <sub>2A</sub> =	30 %
%HSAL=	3 %
%HR, <sub>4</sub> =	90 %
T <sub>5</sub> =	20 °C
X <sub>MAR</sub> =	35 g/L
T <sub>6</sub> =	15 °C

Para el análisis, se tomó como valor máximo 80 °C y un mínimo de 50 °C, variando la temperatura de entrada de la salmuera cada 5 °C. Se obtuvieron resultados de la Tabla 8 y 9, los cuales muestran los valores de algunos parámetros en donde no se reveló una variación, y resultados en los que el simulador mostró variación, respectivamente.

**Tabla 8.** Resultado fijo obtenido al variar la temperatura de la salmuera a la entrada del secador por aspersión.

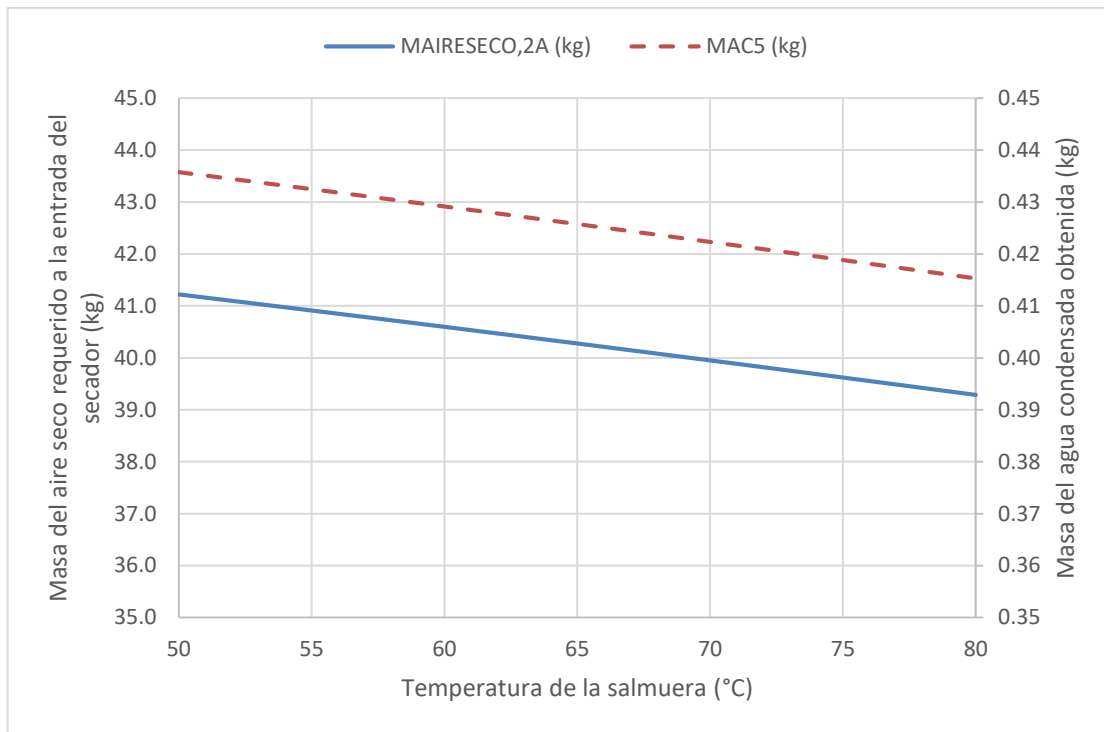
<b>Parámetro</b>	<b>Valor fijo obtenido</b>
<b>M<sub>3</sub> (kg)</b>	0.0721

**Tabla 9.** Resultados obtenidos al cambiar la temperatura de la salmuera a la entrada del secador por aspersión.

T1B (°C)	MAGUA,1B (kg)	MAIRESECO,2A (kg)	MVA4 (kg)	MAC5 (kg)	Q7 (MJ)	QSDRY (MJ)	QSDRY/MAC5 (MJ/kg agua)	MAC5/MVA4 (kg agua condensada/kg agua total)	MAC5/MAGUA,1B (kg agua condensada/kg agua en la salmuera)
50	0.9699	41.2203	1.1951	0.4357	2.9533	2.4039	5.5170	0.3646	0.4492
55	0.9674	40.9109	1.1909	0.4324	2.9429	2.4063	5.5644	0.3631	0.4470
60	0.9648	40.5959	1.1866	0.4291	2.9321	2.4083	5.6123	0.3616	0.4448
65	0.9620	40.2755	1.1821	0.4257	2.9210	2.4100	5.6607	0.3602	0.4425
70	0.9592	39.9502	1.1774	0.4223	2.9095	2.4112	5.7097	0.3587	0.4403
75	0.9562	39.6202	1.1726	0.4188	2.8977	2.4120	5.7593	0.3571	0.4380
80	0.9532	39.2859	1.1677	0.4153	2.8855	2.4125	5.8096	0.3556	0.4357

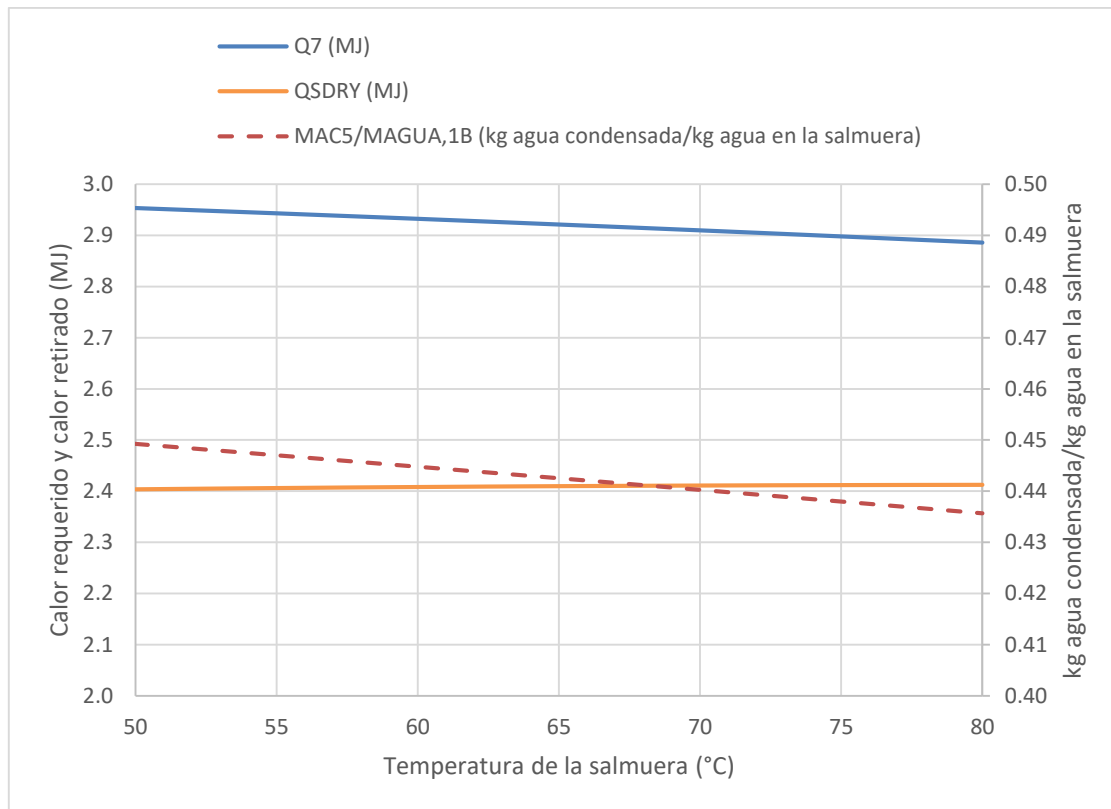
Para visualizar algunos parámetros de la Tabla 9 se construyeron dos gráficos. La Figura 17 muestra el primer gráfico, donde se puede observar que la masa de aire seco a la entrada del secador por aspersión y la masa de agua condensada disminuyen conforme la temperatura de la salmuera aumenta. El motivo de la disminución de la masa de aire seco con el cambio de temperatura de la salmuera es por el calor latente de vaporización de la salmuera. Para obtener los kg de aire seco requeridos en el sistema, se utiliza la diferencia de entalpía del aire seco, el cual se mantiene constante porque las condiciones del aire son constantes según el CASO 2. Además de la diferencia de entalpía, se utiliza también el calor latente de vaporización de la salmuera. Dicho calor, es el que se requiere para llevar a cabo la evaporación de la salmuera dentro del secador, y ese calor es cubierto por la masa de aire seco de entrada. Como el calor latente de vaporización de la salmuera disminuye conforme la temperatura de la salmuera aumenta (ANEXO F), esto provoca que se necesite menos cantidad de aire seco para cubrir el calor requerido por el secado.





**Figura 17.** Efecto de la temperatura de la salmuera en la masa del aire seco requerido y en la masa de agua condensada obtenida.

Por otro lado, la masa de agua condensada obtenida (MAC5) está en función de la cantidad de agua que contiene tanto la salmuera como el aire de entrada. Los dos fluidos se ven afectados con el cambio de la temperatura de la salmuera. Como se explicó en el párrafo anterior, la cantidad de aire requerido a la entrada del secador disminuye conforme la temperatura de la salmuera aumenta, esto provoca que la cantidad de agua contenida en ese aire de entrada sea menor. Asimismo, el cambio de temperatura de la salmuera tiene un efecto en la densidad de la salmuera, mostrando una disminución de su valor (ANEXO E) y, por ende, se disminuye la cantidad de agua que contiene esa salmuera de entrada. Por lo que la disminución tanto en el lado de la salmuera como en el aire, influyen en la disminución de la masa de agua que entra al sistema, el cual se obtiene una parte de ella en la etapa de condensación. A pesar de que exista una disminución del valor de la masa de aire seco requerido y la masa de agua condensada obtenida, dicha disminución no es tan significativa. La diferencia de la masa de aire seco y la masa de agua condensada este alrededor de 2 kg y 0.02 kg, respectivamente.



**Figura 18.** Efecto de la temperatura de la salmuera en el calor requerido por el secador por aspersión, el calor retirado por el agua de mar en el condensador y en el rendimiento del agua potable del sistema.

En la Figura 18 se puede observar que el calor retirado por el agua de mar dentro del condensador ( $Q_7$ ), disminuye levemente conforme aumenta la temperatura de la salmuera. Esto es debido a que también disminuye levemente la cantidad de vapor de agua que se obtiene después del secado de la salmuera ( $M_{VA4}$ ), lo cual está relacionado con la disminución de agua en la salmuera y en el aire de entrada al secador. Por otro lado, el calor requerido para procesar la salmuera ( $Q_{SDRY}$ ) también disminuye levemente conforme la temperatura de la salmuera a la entrada del secador aumenta. Dicha disminución está relacionada con el comportamiento del calor latente de vaporización de la salmuera, lo cual se explicó anteriormente cuando se habló de la disminución del aire seco requerido. La leve disminución de los dos calores en el rango de  $50^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  en la temperatura de la salmuera oscila entre 0.068 y 0.0087, respectivamente.

El rendimiento de obtención de agua potable (MAC5/MAGUA,1B) disminuye conforme la temperatura de la salmuera a la entrada del secador aumenta, es decir, mientras se aumenta la temperatura de la salmuera, se obtiene menor cantidad de agua condensada por cada cantidad de agua contenida en la salmuera que entra al sistema. La ligera disminución es de aproximadamente 3%. Eso se debe a la densidad de la salmuera y a la cantidad de agua contenida en el aire a la entrada del secador, los cuales disminuyen con el aumento de temperatura de la salmuera.

### 4.3. Caso 3. Variación del porcentaje de la humedad relativa del aire atmosférico

Para la variación del porcentaje de la humedad relativa del aire atmosférico, se establecieron valores de entrada en algunos parámetros que se encuentran descritos en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Valor de los parámetros de entrada del Caso 3.

VALORES DE PARAMETROS DE ENTRADA		
T1A=	25	°C
M1A=	1	Litros
T1B =	60	°C
X1=	70	g/L
T2A =	25	°C
T2B =	80	°C
%HSAL=	3	%
%HR,4=	90	%
T5=	20	°C
XMAR=	35	g/L
T6=	15	°C

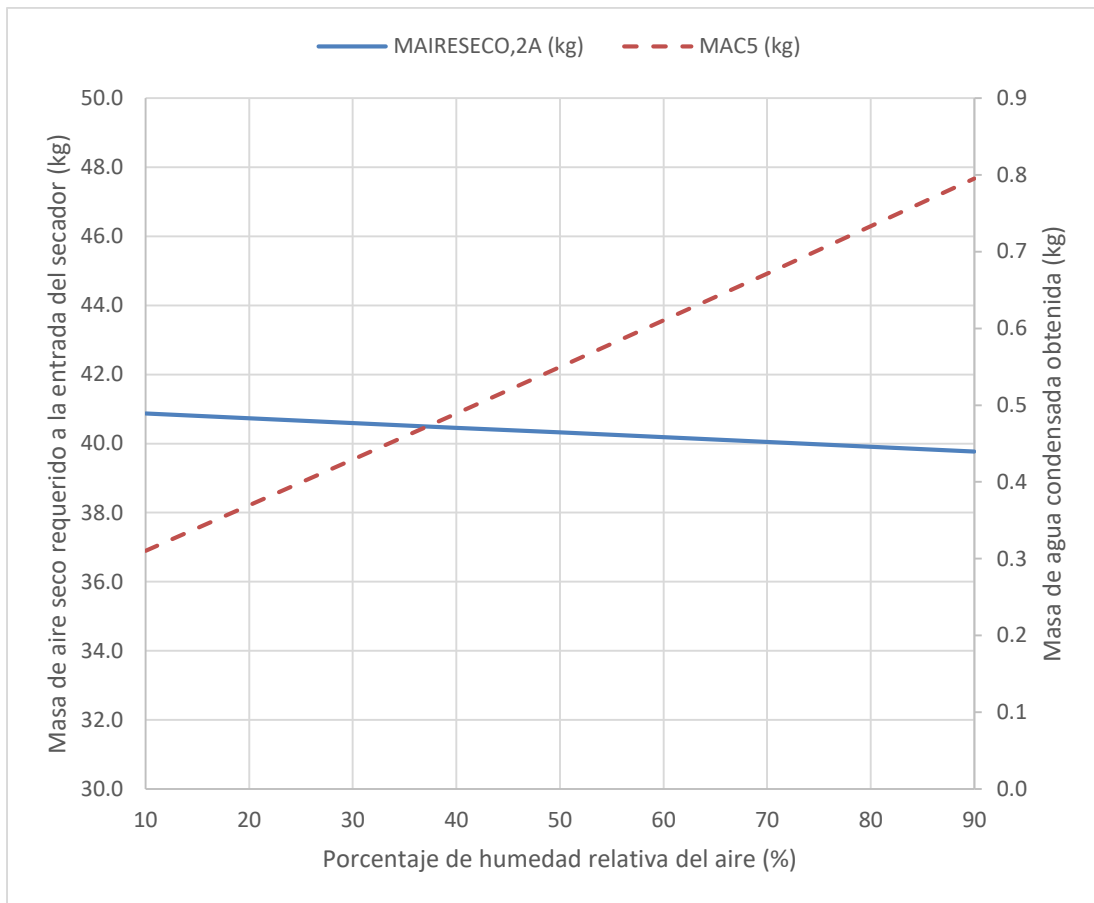
Para el análisis, se tomó como valor máximo 90% y un mínimo de 10%, variando el porcentaje de humedad relativa cada 10%. Se obtuvieron resultados de la Tabla 11 y 12, los cuales muestran los resultados de algunos parámetros en donde no se apreció variación de su valor en el simulador y resultados en los que el simulador mostró variación, respectivamente.

**Tabla 11.** Resultados fijos obtenido al variar el porcentaje de humedad relativa del aire atmosférico.

Parámetro	Valor fijo obtenido
<b>M3 (kg)</b>	0.0721
<b>MAGUA,1B (kg)</b>	0.9648
<b>QSDRY (MJ)</b>	2.4083

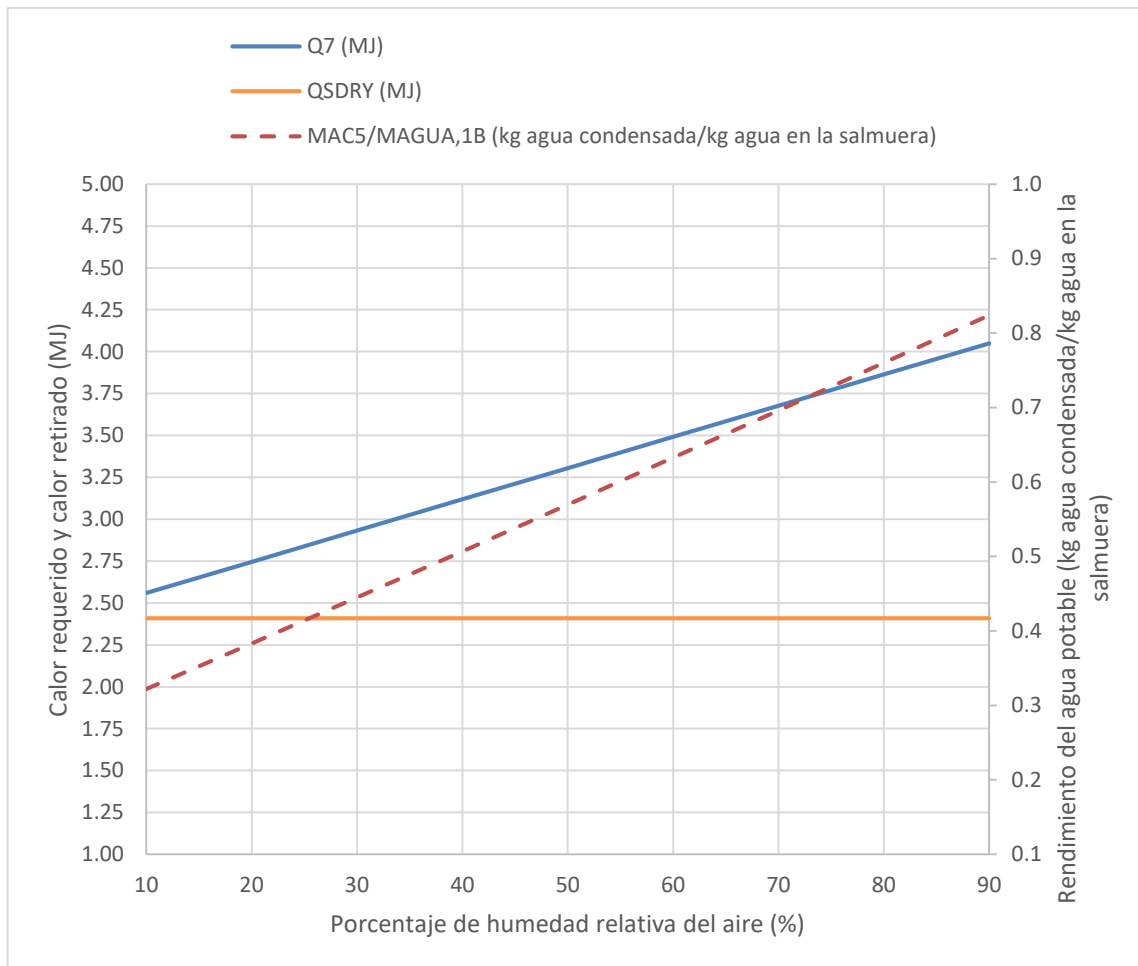
**Tabla 12.** Resultados obtenidos al cambiar el porcentaje de humedad relativa del aire atmosférico.

%HR, 2A	MAIRESECO,2A (kg)	MVA4 (kg)	MAC5 (kg)	Q7 (MJ)	QSDRY/MAC5 (MJ/kg agua)	MAC5/MVA4 (kg agua condensada/kg agua total)	MAC5/MAGUA,1B (kg agua condensada/kg agua en la salmuera)
<b>10</b>	40.8717	1.0374	0.3106	2.5596	7.7549	0.2994	0.3219
<b>20</b>	40.7338	1.1120	0.3696	2.7459	6.5163	0.3324	0.3831
<b>30</b>	40.5959	1.1866	0.4291	2.9321	5.6123	0.3616	0.4448
<b>40</b>	40.4581	1.2611	0.4891	3.1184	4.9239	0.3878	0.5070
<b>50</b>	40.3205	1.3355	0.5495	3.3047	4.3825	0.4115	0.5696
<b>60</b>	40.1830	1.4099	0.6104	3.4909	3.9458	0.4329	0.6326
<b>70</b>	40.0456	1.4842	0.6715	3.6772	3.5863	0.4525	0.6961
<b>80</b>	39.9083	1.5585	0.7331	3.8634	3.2852	0.4704	0.7598
<b>90</b>	39.7712	1.6326	0.7950	4.0497	3.0294	0.4869	0.8240



**Figura 19.** Efecto del porcentaje de la humedad relativa del aire con la masa de aire seco requerido en la entrada del secador y con la masa de agua condensada obtenida.

En la Figura 19 se puede observar que la masa de aire seco requerido a la entrada del secador disminuye ligeramente conforme el porcentaje de humedad relativa aumenta. Esta disminución es de 2.96%. Esto es porque conforme se aumenta el porcentaje de humedad relativa contenido en el aire atmosférico, mayor es el valor del cambio de entalpía que presenta y, por ende, se necesita menos masa de aire seco para cubrir el calor requerido en el proceso dentro de la cámara de secado. Además, en la Figura 19 también se puede apreciar que la masa de agua condensada obtenida aumenta cuando el porcentaje de humedad relativa también aumenta. Esto ocurre porque cuanto mayor es el porcentaje de humedad relativa del aire, mayor es la cantidad de vapor de agua contenida en ese mismo aire y, por lo tanto, saldría mayor cantidad de vapor de agua en la parte superior del secador por aspersion, y finalmente, se condensaría mayor cantidad de ese vapor de agua, transformándose en agua condensada.



**Figura 20.** Efecto del porcentaje de humedad relativa del aire en el calor requerido por el secador por aspersión, el calor retirado por el agua de mar en el condensador y en el rendimiento del agua potable del sistema.

En la Figura 20 se puede apreciar que el calor requerido por el sistema de secado para procesar la salmuera se mantiene constante debido a que éste calor no depende de las condiciones del aire atmosférico (temperatura, porcentaje de humedad relativa), más bien, depende de las condiciones de la salmuera. Por otro lado, el calor retirado por el agua de mar en la etapa de condensación sí influye de las condiciones del aire, mostrándose un comportamiento que va en aumento conforme el porcentaje de humedad relativa del aire aumenta. Su aumento en el rango estudiado es de 36.8%. Dicho comportamiento se debe al vapor de agua contenida en el aire, ya que dicho valor aumenta cuando el porcentaje de humedad relativa también aumenta, esto ocasiona que se tenga mayor cantidad de vapor de agua en la entrada del condensador y, por

consiguiente, esto produce que el agua de mar requiera de más cantidad de energía para poder realizar el cambio de fase, obteniendo un aumento también, en la cantidad de masa de agua condensada obtenida. Además, por esa razón, se observa un aumento del 60.93 % en la razón de la masa de agua condensada obtenida entre la masa de agua contenida en la salmuera en el flujo inicial ( $MAC5/MAGUA,1B$ ).

#### 4.4. Caso 4. Variación de la concentración de la salmuera en la entrada del secador por aspersión

Para la variación de la concentración de la salmuera, se establecieron valores de entrada en algunos parámetros (Tabla 13).

**Tabla 13.** Valor de los parámetros de entrada del Caso 4.

---

#### VALORES DE PARAMETROS DE ENTRADA

T1A=	25	°C
T1B=	60	°C
M1A=	1	Litros
T2A =	25	°C
T2B =	80	°C
%HR,2A=	30	%
%HSAL=	3	%
%HR,4=	90	%
T5=	20	°C
XMAR=	35	g/L
T6=	15	°C

---

Para el análisis, se tomó como valor máximo 120 g/L y un mínimo de 50 g/L, variando la concentración de la salmuera cada 10 g/L. Se obtuvieron resultados de la Tabla 14. En este CASO 4, no se obtuvieron valores fijos o constantes en los parámetros principales estudiados.

**Tabla 14.** Resultados obtenidos al cambiar el valor de la concentración de la salmuera.

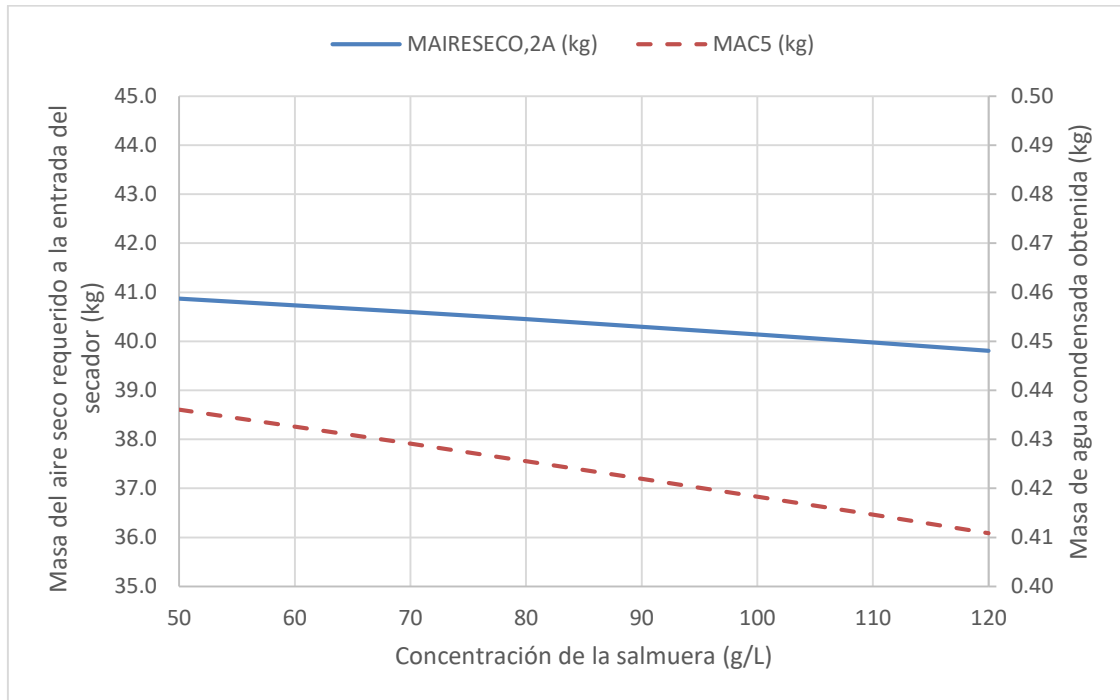
<b>X1 (g/L)</b>	<b>MAGUA,1B (kg)</b>	<b>MAIRESECO,2A (kg)</b>	<b>M3 (kg)</b>	<b>MVA4 (kg)</b>	<b>MAC5 (kg)</b>	<b>Q7 (MJ)</b>	<b>QSDRY (MJ)</b>	<b>QSDRY/MAC5 (MJ/kg agua)</b>	<b>MAC5/MVA4 (kg agua condensada/kg agua total)</b>	<b>MAC5/MAGUA,1B (kg agua condensada/kg agua en la salmuera)</b>
<b>50</b>	0.970	40.869	0.052	1.199	0.436	2.963	2.425	5.562	0.364	0.450
<b>60</b>	0.967	40.736	0.062	1.193	0.433	2.948	2.417	5.587	0.363	0.447
<b>70</b>	0.965	40.596	0.072	1.187	0.429	2.932	2.408	5.612	0.362	0.445
<b>80</b>	0.962	40.450	0.082	1.180	0.426	2.917	2.399	5.638	0.361	0.442
<b>90</b>	0.960	40.298	0.093	1.174	0.422	2.901	2.390	5.664	0.359	0.440
<b>100</b>	0.957	40.139	0.103	1.168	0.418	2.886	2.380	5.690	0.358	0.437
<b>110</b>	0.954	39.975	0.113	1.162	0.415	2.870	2.370	5.717	0.357	0.435
<b>120</b>	0.952	39.804	0.124	1.155	0.411	2.855	2.360	5.744	0.356	0.432

En la Tabla 14 se puede observar que los parámetros que aumentan de valor conforme la concentración de la salmuera aumenta son: la masa de la sal obtenida después de haber pasado por el secado por aspersion (M3) y la razón del calor que se necesita utilizar en la etapa de secado por cada kg de agua condensada obtenida (QSDRY/MAC5).

Los parámetros que disminuyen de valor conforme la concentración de la salmuera aumenta son: la masa de agua contenida en la salmuera (MAGUA,1B), la masa de aire seco requerido en la entrada del secador por aspersion (MAIRESECO,2A), la masa de vapor de agua obtenida después del proceso de secado el cual se añade al condensador (MVA4), la masa de agua condensada obtenida después de la condensación (MAC5), el calor retirado por el agua de mar en la etapa de condensación (Q7), el calor



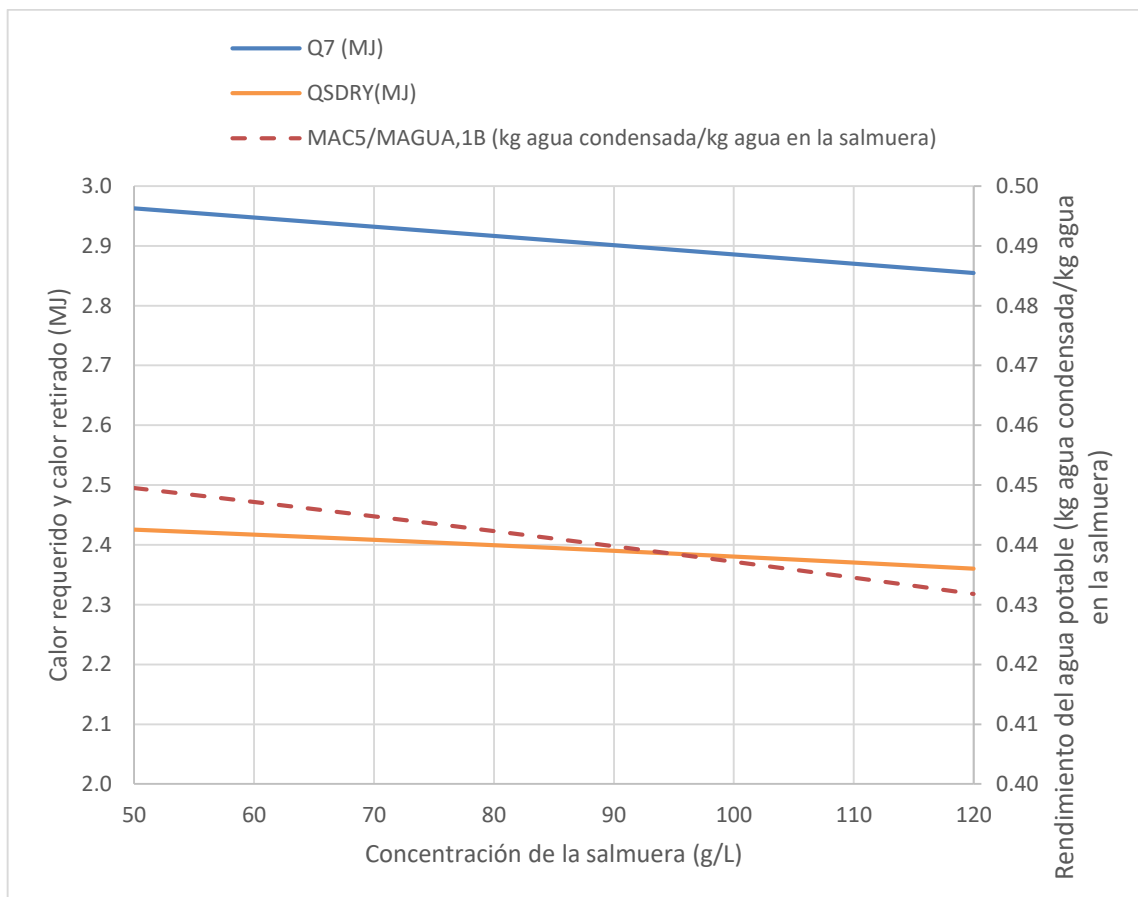
requerido por el sistema para procesar la salmuera (QSDRY), el rendimiento del condensador, el cual es equivalente a la razón de los kg de agua condensada obtenidos entre los kg de agua totales que entran al sistema ( $MAC5/MVA4$ ); y el rendimiento del agua potable, el cual es equivalente a la razón de los kg de agua condensada obtenidos entre los kg de agua que contiene la salmuera que entra al sistema ( $MAC5/MAGUA,1B$ ).



**Figura 21.** Efecto de la concentración de la salmuera en la masa del aire seco requerido a la entrada del secador y en la masa de agua condensada obtenida.

En la Figura 21 se puede observar que la masa de aire seco requerido a la entrada del secador, y la masa de agua condensada obtenida después de la etapa de condensación, disminuyen levemente conforme la concentración de la salmuera aumenta, cuantitativamente es 2.6% y 5.73%, respectivamente. La primera disminución se debe a que la presión de vapor saturado cambia con la temperatura (aumentando) y la concentración de la salmuera (disminuyendo), entonces, ese cambio hace que se obtengan diferentes valores de la presión parcial de vapor y, por ende, diferentes valores de la humedad absoluta y entalpía. Aunque dicho cambio es muy bajo (menor a una unidad en valor y menor a 5% en porcentaje), lo importante aquí es establecer que ocurre un comportamiento de disminución leve y la justificación de dicho comportamiento. La

disminución de la masa de agua condensada obtenida después de la etapa de condensación, ocurre por la densidad de la salmuera. Conforme aumenta la concentración de la salmuera, la densidad de la salmuera aumenta también porque hay más cantidad de sal y menos cantidad de agua dentro de esa solución de salmuera, por lo que entrará menos cantidad de agua al proceso de secado por el lado de la salmuera, y así mismo, por el lado del aire, entrará menos cantidad de agua al proceso de secado debido a que el flujo de aire será menor conforme la concentración de salmuera aumenta. De esta forma, sumando las cantidades de agua/vapor de agua de los dos fluidos de entrada, disminuirá levemente el valor de la masa de vapor de agua que sale por la parte superior del secador por aspersion (MVA4).



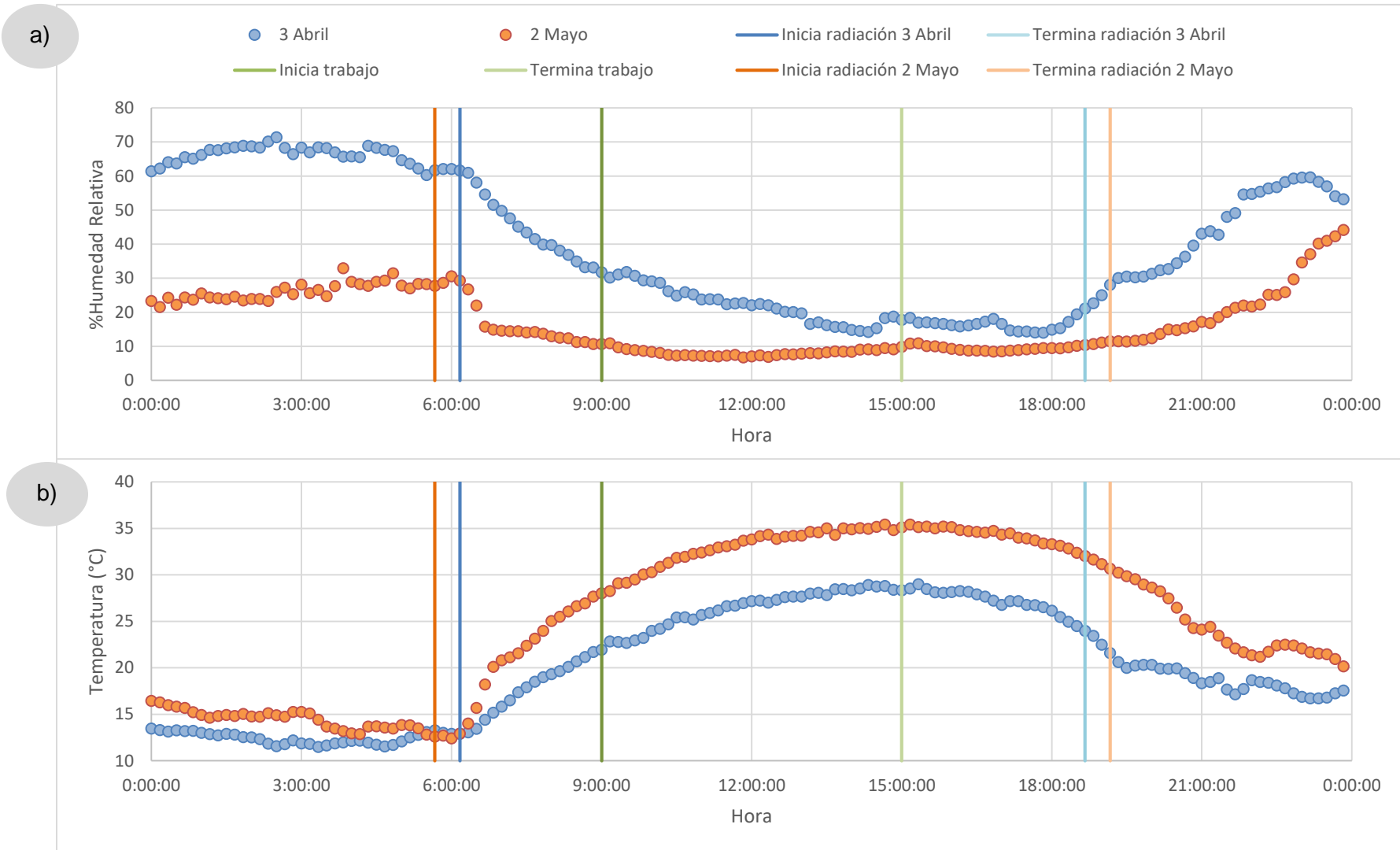
**Figura 22.** Efecto de la concentración de la salmuera en el calor requerido por el secador por aspersion, el calor retirado por el agua de mar en el condensador y en el rendimiento del agua potable del sistema.

En la Figura 22 se puede observar que el calor total requerido por el sistema para procesar la salmuera y el calor retirado por el agua de mar en la etapa de condensación disminuyen levemente conforme la concentración de la salmuera aumenta. Dichos calores están relacionados con la disminución que hay en la relación del agua condensada obtenida entre el agua contenida en la salmuera (MAC5/MAGUA,1B). Además, es debido a la variación de los siguientes parámetros que produce el cambio de concentración de la salmuera: densidad, presión de vapor saturado y entalpía.

#### **4.5. Caso 5. Estudio utilizando las condiciones de dos días tomados del mes típico del Año Típico Meteorológico (TMY)**

Se utilizaron días representativos tomados del mes típico del TMY de Hermosillo, Sonora (Altamirano Carranza, 2020). Dicho análisis se realizó para tener una visualización mejor de lo que se obtendrá de agua condensada y sal, además, de lo requerido de masa de aire seco en la entrada del secador. Estos resultados concordarían si nuestro sistema de desalinización se llevará a cabo en esas fechas del año, ya que se estarían utilizando valores de entrada en tiempo real de algunos parámetros.

Primeramente, se seleccionaron las condiciones de dos días que no tuvieran valores parecidos entre ellos, siendo los seleccionados el día 3 de abril, 2 de mayo; obteniéndose las gráficas de la Figura 23 (a y b). Dichas gráficas, muestran los valores del porcentaje de humedad relativa y la temperatura de bulbo seco del aire atmosférico que cuantifico el higrómetro y el termómetro a lo largo del día. Para añadir valores reales al simulador desarrollado, se establecieron 6 horas de trabajo diarios en un horario de 9 a 15 horas (línea vertical verde de la Figura 23), y se realizó un promedio del valor de los parámetros por hora, los cuales están representados en la Tabla 15. Asimismo, se delimito la hora en la cual el piranómetro presentó un valor de radiación solar global el cual se encuentra representado en una línea vertical azul (3 abril) y anaranjada (2 mayo) para visualizar el efecto de ese parámetro en el comportamiento de la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco del aire atmosférico.



**Figura 23.** Valores reales del a) %HR y b) temperatura de bulbo seco del 3 de abril y 2 de mayo.

**Tabla 15.** Resultados promedios por hora del %HR y la temperatura de bulbo seco del aire atmosférico del día 3 de abril y 2 de mayo.

HORA	3 DE ABRIL		2 DE MAYO	
	%HR	Temperatura bulbo seco (°C)	%HR	Temperatura bulbo seco (°C)
09:00:00 A. M.	31.70	21.94	10.65	28.00
10:00:00 A. M.	30.38	23.06	9.28	29.38
11:00:00 A. M.	25.76	25.08	7.46	31.76
12:00:00 P. M.	22.87	26.58	7.12	33.22
01:00:00 P. M.	20.89	27.40	7.47	34.13
02:00:00 P. M.	15.97	28.18	8.25	34.72
03:00:00 P. M.	16.47	28.61	9.23	35.07

**Tabla 16.** Valor de los parámetros de entrada del Caso 5.

### VALORES DE PARAMETROS DE ENTRADA

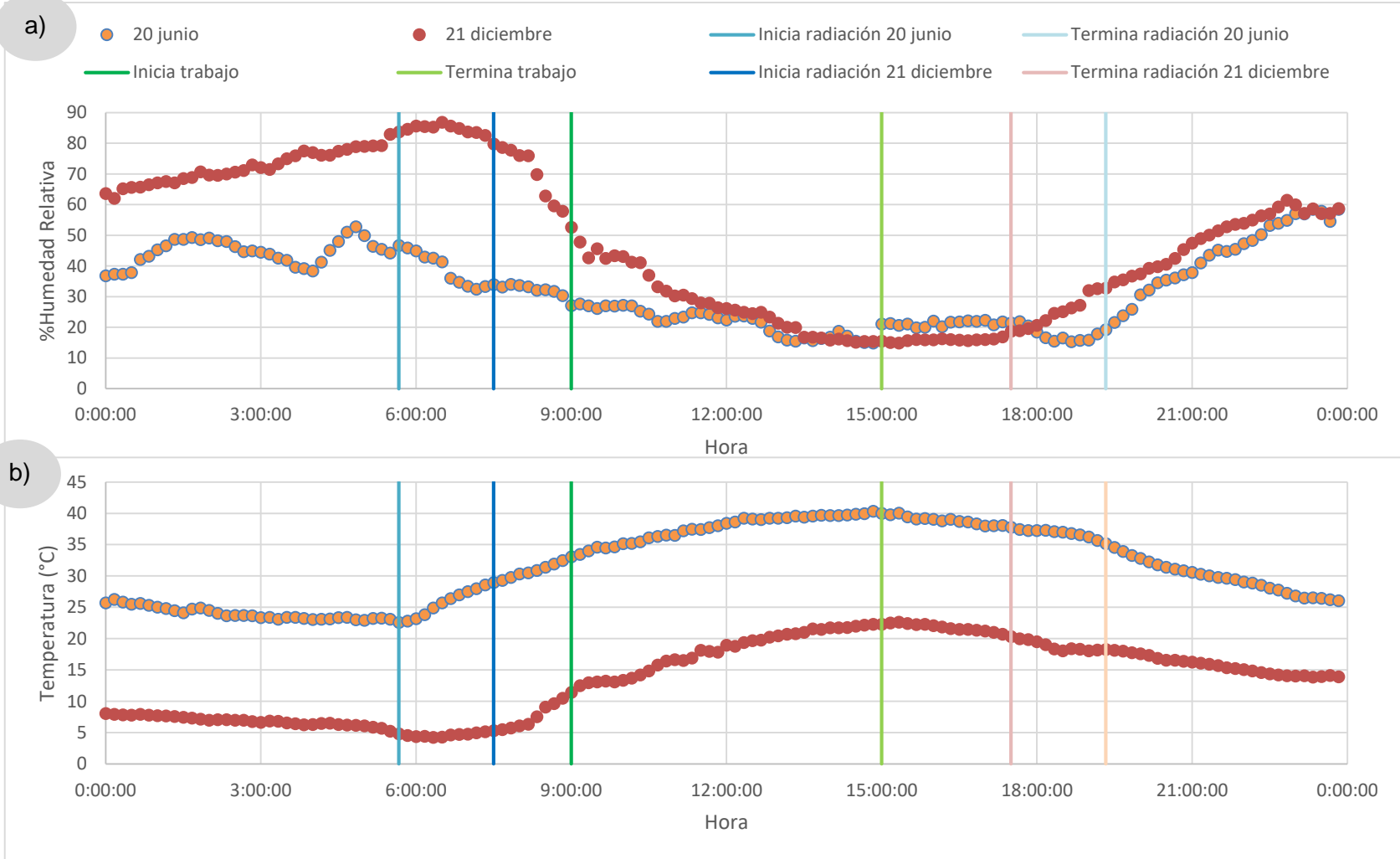
T1A=	25 °C
T1B=	60 °C
M1A=	1 Litros
X1=	70 g/L
T2B =	80 °C
%HSAL=	3 %
%HR,4=	90 %
T5=	20 °C
XMAR=	35 g/L
T6=	15 °C

Se utilizaron los valores del %HR y temperatura de bulbo seco del aire atmosférico de la Tabla 15 y valores de otros parámetros de entrada que se encuentran descritos en la Tabla 16, para obtener relaciones de algunos parámetros importantes con respecto a 1 litro de salmuera que entra al sistema (Tabla 17).

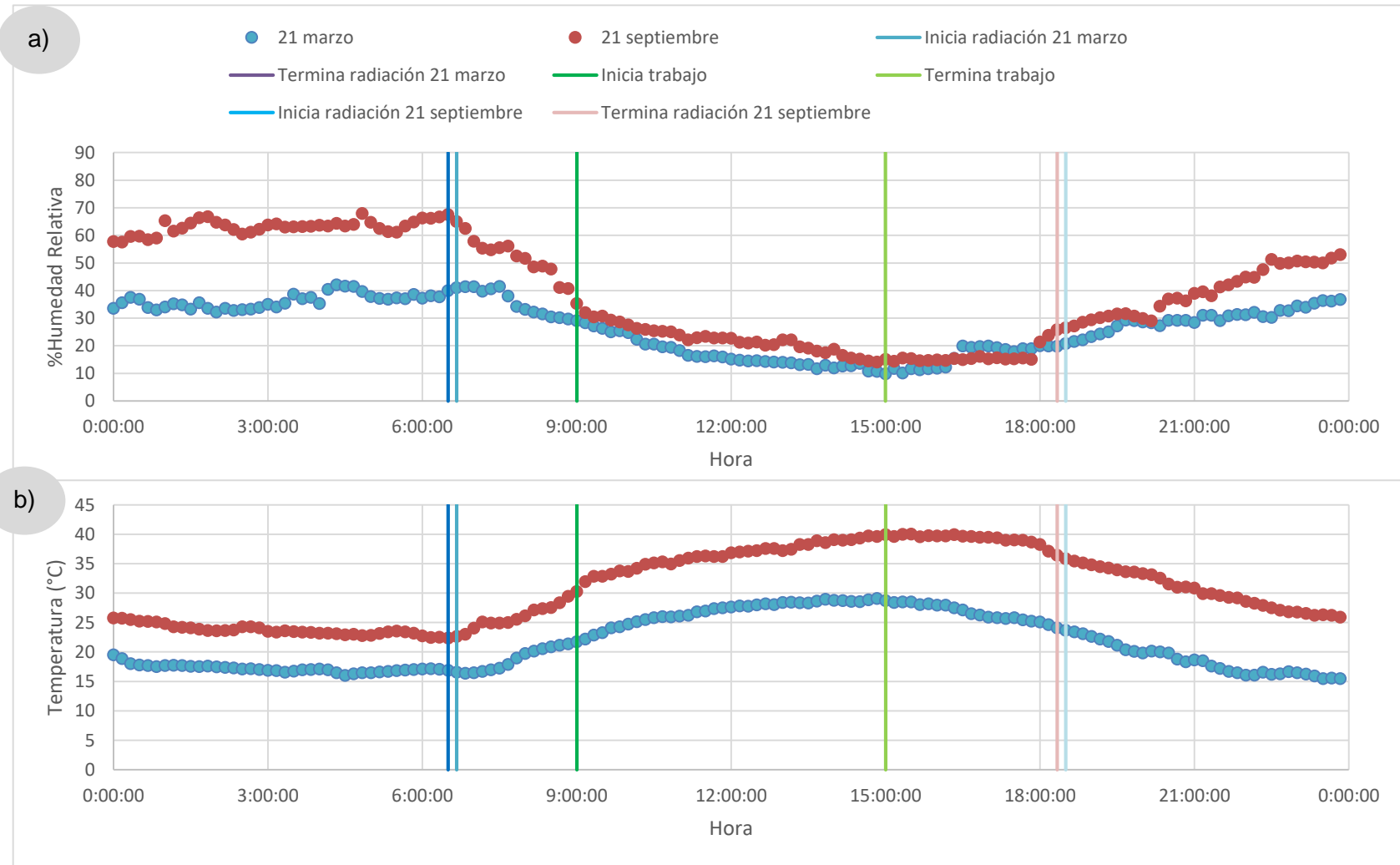
**Tabla 17.** Relación de algunos parámetros de estudio con respecto a un litro de salmuera entrante al sistema, simulando 6 horas de trabajo de los días 3 de abril y 2 de mayo del mes típico del TMY.

<b>Relación</b>	<b>3 de abril</b>	<b>2 de mayo</b>
<b>kg aire seco requerido/ litro salmuera entrante</b>	41.385	47.230
<b>kg agua condensada obtenida/ litro salmuera entrante</b>	0.400	0.382
<b>kg sal obtenida/ litro salmuera entrante</b>	0.072	0.072
<b>kg de agua de mar necesario/ litro salmuera entrante</b>	65.247	61.414
<b>Energía total requerida/ litro salmuera entrante</b>	2.408	2.408

Los kilogramos de aire seco requerido por cada litro de salmuera que entra al sistema, fue menor el 3 de abril con respecto al 2 de mayo. Por el contrario, por cada litro de salmuera entrante al sistema, los kilogramos de agua condensada que se obtienen al final del proceso de desalinización fue menor el día 2 de mayo; y también, fue menor en los resultados de los kilogramos de agua de mar necesarios para condensar el aire húmedo que entra al condensador. Los parámetros que se mantuvieron constantes tanto el 3 de abril como el 2 de mayo fueron los kilogramos de sal obtenidos y la energía total requerida por el sistema. De la misma manera, se obtuvieron relaciones utilizando los dos días del solsticio (20 de junio y 21 de diciembre) y los dos días del equinoccio (21 de marzo y 21 de septiembre). Los gráficos correspondientes a cada momento del año, se muestra en la Figura 24 (a y b) y en la Figura 25 (a y b). Por consiguiente, las relaciones de algunos parámetros de estudio con respecto a un litro de salmuera entrante al sistema, se encuentran en la Tabla 18 y 19.



**Figura 24.** Valores reales del a) %HR y b) temperatura de bulbo seco del 20 de junio y 21 de diciembre.



**Figura 25.** Valores reales del a) %HR y b) temperatura de bulbo seco del 21 de marzo y 21 de septiembre.



**Tabla 18.** Relación de algunos parámetros de estudio con respecto a un litro de salmuera entrante al sistema, simulando 6 horas de trabajo de los días 20 de junio y 21 de diciembre del mes típico del TMY.

Relación	20 de junio	21 de diciembre
kg aire seco requerido/ litro salmuera entrante	51.939	35.825
kg agua condensada obtenida/ litro salmuera entrante	0.667	0.312
kg sal obtenida/ litro salmuera entrante	0.072	0.072
kg de agua de mar necesario/ litro salmuera entrante	79.388	61.454
Energía total requerida/ litro salmuera entrante	2.408	2.408

**Tabla 19.** Relación de algunos parámetros de estudio con respecto a un litro de salmuera entrante al sistema, simulando 6 horas de trabajo de los días 21 de marzo y 21 de septiembre del mes típico del TMY.

Relación	21 de marzo	21 de septiembre
kg aire seco requerido/ litro salmuera entrante	41.763	50.377
kg agua condensada obtenida/ litro salmuera entrante	0.374	0.640
kg sal obtenida/ litro salmuera entrante	0.072	0.072
kg de agua de mar necesario/ litro salmuera entrante	63.247	78.218
Energía total requerida/ litro salmuera entrante	2.408	2.408

Al realizar una comparación de los resultados de la Tabla 18 y 19, el objetivo de estas tablas es analizar lo que pasa con algunos parámetros cuando se tienen un litro de salmuera entrando al sistema, en los días solsticios y equinoccios. Nos damos cuenta que el 21 de diciembre se requiere menor cantidad de kilogramos de aire seco a la entrada del proceso, y que el 20 de junio es el día extremo en el que se requiere de mayor cantidad de aire seco para poder llevar a cabo la adecuada transferencia de masa y calor dentro de la cámara del secador por aspersion. Los valores están oscilando entre 35.825 a 51.939 kg de aire seco.

Por otro lado, el día que se obtiene mayor cantidad de agua condensada es el 20 de junio, y cuando se obtiene menor cantidad, es el 21 de diciembre. Podemos observar una diferencia notable en este parámetro. Se observa que el 21 de diciembre se obtendría menos de la mitad de la cantidad de agua condensada con respecto al 20 de junio. Es decir, las condiciones de verano son favorables para obtener la mayor cantidad de agua condensada en el proceso de desalinización, pero esto implica que se requiera mayor cantidad de aire seco a la entrada del secador.

El mismo efecto tiene el flujo de agua de mar que se necesita en el condensador, el 21 de diciembre y el 20 de junio, requieren menor y mayor cantidad de flujo de agua de mar, respectivamente. Pero no hay mucha diferencia entre los valores, ya que el rango entre esos dos días es de 61.454 a 79.388 kg de agua de mar.

Por otro lado, la cantidad de sal que se obtiene en el proceso y la energía total requerida por el sistema permaneció constante a lo largo de la variación de los valores del aire atmosférico. Estableciendo que se obtendrían 0.072 kg de sal y que se requiere de 2.408 MJ de energía, por cada litro de salmuera que entre al proceso.

#### **4.6. Simulador termodinámico desarrollado**

El simulador termodinámico se desarrolló en una página de Excel que incluye 11 pestañas. En la primera pestaña, llamada Página Principal, se muestra el diagrama general de la desalinización de la salmuera usando un secador por aspersion (Figura

26), el cual está automáticamente vinculado con el resto de las pestañas en donde se realiza el cálculo correspondiente para la obtención de cada uno de los parámetros de salida. El diagrama general está conformado por 7 líneas de flujo representados por rombos azules, y los fluidos que transportan dichas líneas están resaltados por rectángulos. La línea 1 y 2 lo conforman la salmuera y el aire, respectivamente; las cuales se dividen en A y B, siendo A el término que representa los valores de parámetros a condiciones ambientales, y el término B representa los valores de los mismos fluidos, pero con un incremento de temperatura, es decir, los fluidos se calientan de una condición A a una condición B. Por otro lado, las celdas en amarillo representan los valores de los parámetros a los que se les puede cambiar su valor, ninguna otra celda que no tenga color amarillo se puede cambiar el valor porque afectaría en la vinculación que tiene el simulador desarrollado.

Por otro lado, el valor del calor sensible de la salmuera y del aire, está resaltado por un rectángulo de color anaranjado que se encuentra en el lado izquierdo del diagrama (arriba de los rombos con número 1 y 2); y el calor total requerido por el sistema para procesar la salmuera, está simbolizado por la misma figura anterior, pero relleno con un color morado-azulado.

Asimismo, el diagrama general de desalinización esquematiza dos equipos importantes: el secador por aspersion y el condensador. Los flujos de entrada del secador por aspersion son la salmuera y el aire; y los flujos de salida son la sal y el aire más el vapor de agua. Ese mismo aire combinado con el vapor de agua y el agua de mar son los dos fluidos de entrada al condensador; y el agua de mar, el agua condensada y el aire húmedo perdido son los fluidos de salida del condensador. Se enfatiza que el agua de mar entra al condensador en flujo a contracorriente.

A continuación, se muestra el diagrama general de desalinización de la salmuera, la cual es la página principal del simulador que se desarrolló.

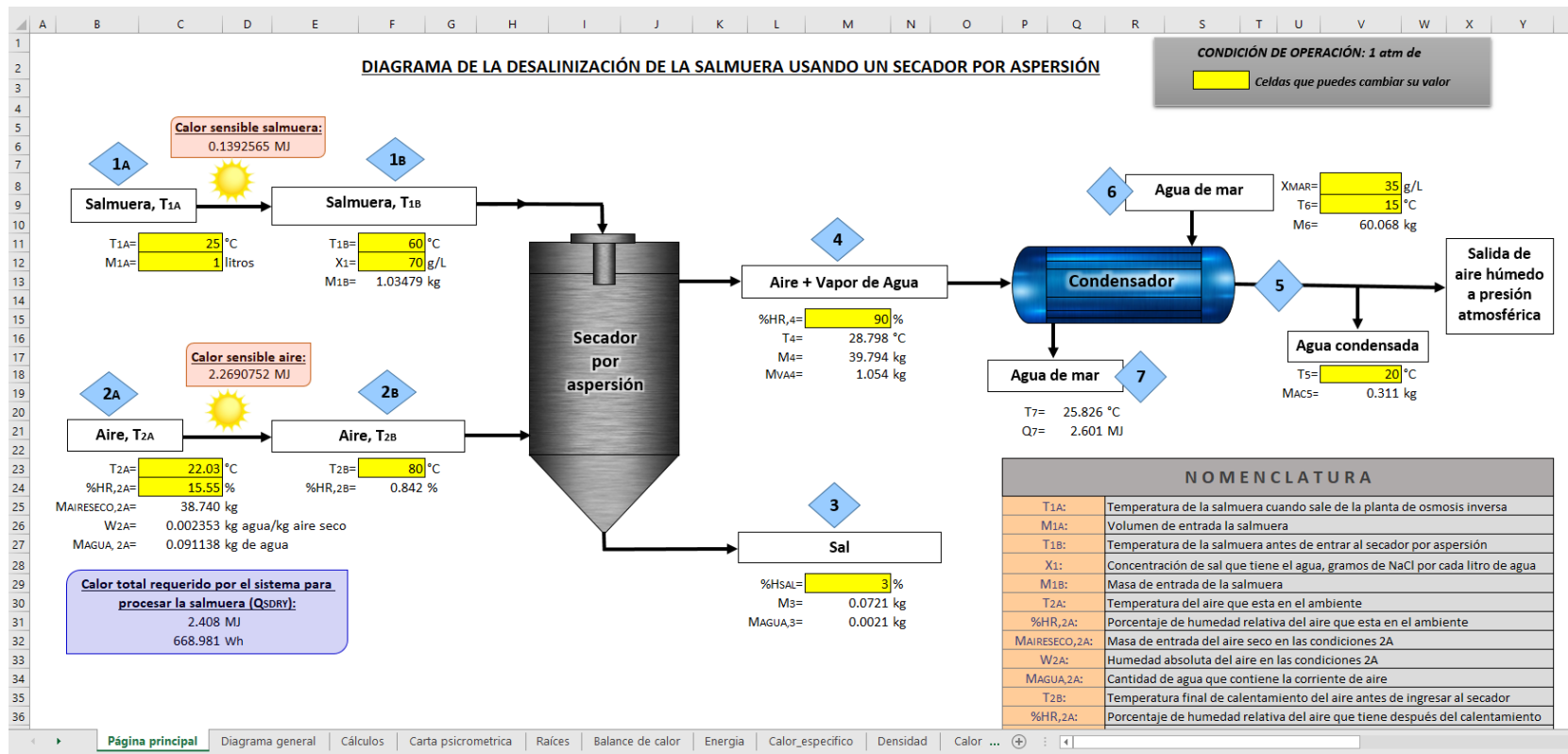


Figura 26. Página principal indicando el diagrama del simulador termodinámico que se desarrolló para la desalinización de la salmuera usando un equipo de secado por aspersión.

#### 4.7. Suministro de calor con energía solar

El simulador nos ofrece la cantidad teórica de calor requerido para llevar a cabo el proceso. Esta cantidad de energía se ha planteado suministrarlo con energía solar, por lo que se estimó en forma gruesa, el área necesaria a utilizar. Tomando en consideración las condiciones de entrada, y tomando en cuenta los valores de los parámetros del Caso 1, 2, 3 y 4; el simulador estableció que se requiere de aproximadamente 2.4 MJ de energía por cada litro de salmuera que es alimentada al proceso. Por lo tanto, si sabemos que, en la región de Hermosillo, Sonora; se reciben en promedio  $6 \frac{kWh}{m^2 día}$  en forma de radiación global horizontal diaria promedio anual (Cabanillas, 2005), este valor en Joules serían  $21.6 \frac{MJ}{m^2 día}$ ; entonces por cada  $m^2$  de colector solar que se instale, se pueden procesar 10 litros de salmuera al día. Es decir, si se tiene una producción diaria de 5,000 litros de salmuera, se requerirán  $500 m^2$  de colectores.

#### 4.8. Comparación del agua obtenida en el simulador desarrollado, con respecto a destiladores solares existentes

Considerando las Tablas 18 y 19, y lo obtenido en el suministro de calor con energía solar, obtenemos como resultado que por cada  $m^2$  de colector solar que se instale, se pueden procesar 10 litros de salmuera al día, obteniendo de 3 a 7 kg de agua condensada y 0.72 kg de sal.

Según la literatura, un destilador solar básico tipo caseta con un reflector vertical externo (Tiwari & Tiwari, 2006), obtiene  $1.7 \text{ kg}/m^2/día$ . Un destilador solar tipo cascada (Tiwari & Tiwari, 2006), obtiene  $1.6 \text{ kg}/m^2/día$ . Un destilador solar acoplado con un condensador externo (El-Bahi & Inan, 1999), obtiene  $7 \text{ kg}/m^2/día$ . Un destilador solar acoplado con un almacenamiento de cambio de fase (PCM) (Tanaka, 2009), obtiene  $13.3 \text{ kg}/m^2/día$ . Comparando los valores anteriores con respecto a lo que se obtuvo en el simulador desarrollado, nos damos cuenta que el sistema propuesto en este proyecto de investigación, es decir, utilizar un secador por aspersión y condensador para obtener

agua, está dentro de los valores de agua que obtienen algunos tipos de destiladores solares.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se desarrolló un programa de simulación termodinámico en un ambiente de hoja electrónica para el estudio macroscópico de la desalinización de la salmuera usando el proceso de secado por aspersion. Se obtuvieron correlaciones de las principales variables termodinámicas requeridas para hacer el balance energético y el balance de masa del proceso. La principal suposición fue que las corrientes están en equilibrio termodinámico.

El programa es alimentado con ciertos parámetros de entrada, en los cuales se especifican las condiciones de los fluidos de ingreso al proceso. El simulador calcula la energía requerida para separar la sal de la salmuera, y condensar parte de la humedad de la mezcla aire-agua de salida. Asimismo, se obtiene la cantidad de masa de aire seco necesario para poder realizar la transferencia de masa y calor dentro de la cámara de aspersion, y el flujo de agua de mar necesario para poder realizar el cambio de fase dentro del condensador. De la misma forma, se obtienen las temperaturas de salida del aire húmedo cuando sale del secador por aspersion, y la temperatura del agua de mar cuando sale del condensador. Los valores de la cantidad de masa de los productos obtenidos (sal y agua) en el proceso de desalinización, también se obtienen en el simulador.

Cuando la temperatura del aire en la entrada del secador por aspersion se añade más caliente (120 °C), se requiere de 23.5 kg de aire y cuando se añade a 60 °C se requiere de 63.8 kg, por lo que la temperatura del aire tiene un efecto importante en la cantidad de masa requerida. Asimismo, el agua condensada que se obtiene también tiene un efecto significativo, teniendo resultados que van de 0.28 a 0.55 kilogramos de agua obtenidos. Por el contrario, al variar la temperatura del aire de 60°C a 120°C, resulta que el calor requerido para procesar la salmuera no se ve afectado, sino que se mantiene

constante. De la misma forma, la cantidad de sal que se obtiene se mantuvo constante, teniendo un resultado de 0.0721 kg de sal obtenidos.

En el caso de variar la temperatura de la salmuera en la entrada del secador de 50 °C a 80 °C, el efecto que tiene con el aire seco requerido y con la cantidad de agua condensada es relativamente muy pequeño, va de 39.28 a 41.22 kg; y 0.44 a 0.42 kg, respectivamente. Además, cuando está alta la temperatura de la salmuera, aumenta el requerimiento de energía para procesar la salmuera de 2.40 a 2.41 MJ, dicho efecto no es significativo, a pesar de que la energía requerida va en aumento. La cantidad de sal que se obtiene tuvo un valor constante de 0.0721 kg de sal.

El aire del medio ambiente presenta variaciones de humedad relativa. Cuando el aire atmosférico está seco se requiere de 40.87 kg de aire seco, y cuando está húmedo, se requiere de 39.77 kg de aire seco, entonces, no hay una variación sustancial para un análisis paramétrico que hicimos para un día donde se varió la humedad de 10% a 90%, es decir, el efecto sobre el flujo de aire es muy pequeño. Por otro lado, el requerimiento total energético se mantiene constante, en 2.40 MJ; y la cantidad de sal obtenida también (0.0721 kg), pero el efecto sobre el agua condensada obtenida sí es fundamental, va de 0.31 a 0.80 kg, obteniendo mucha más cantidad de agua condensada cuando el aire se encuentra más húmedo.

La concentración de la salmuera tiene un efecto directo en la cantidad de sal que se obtiene, variando de 0.052 a 0.124 kg de sal cuando la concentración cambia de 50 a 120 g/L. En cambio, el efecto del aire seco requerido, agua condensada obtenida y el calor requerido para procesar la salmuera, no muestra grandes variaciones, aunque dichos valores disminuyan conforme la concentración de la salmuera aumenta.

Para las condiciones de operación de los días analizados (equinoccios y solsticios), en términos gruesos, se concluyó que, en épocas de verano, se obtiene mayor cantidad de agua condensada y se requiere de mayor cantidad de aire seco. Lo contrario sucede en las épocas de invierno, disminuyendo los valores del agua condensada y del aire seco.

Dado que la Irradiancia Solar promedio diaria anual en gran parte de Sonora es de 6  $\frac{kWh}{m^2 día}$ , se estima, en base de la cantidad de energía requerida para el proceso, que por



cada metro cuadrado de área del colector solar se pueden procesar 10 litros de salmuera por día. Esta relación nos permite dimensionar el área requerida de colectores solares para una determinada cantidad de salmuera proveniente de la planta de ósmosis inversa.

Finalmente, cuando se analizaron las condiciones menos favorables y más favorables de los días tomados del mes típico del TMY, se obtuvo que por cada litro de salmuera que entra al sistema se requiere de 2.41 MJ de energía, equivalente a 670 Watt-hora. Además, se requerirían de 32 a 55 kg de aire seco a la entrada del proceso del secador por aspersión, de 60 a 80 kg de agua de mar a la entrada del proceso de condensación; lo cual, nos permitiría obtener 0.072 kg de sal, y entre 0.3 a 0.7 kg de agua condensada.

El trabajo realizado cumple con los objetivos específicos propuestos y es un estudio completo con bases firmes para poder proseguir a una investigación más a fondo o considerando otros aspectos, como el dimensionamiento del secador por aspersión.

Una de las recomendaciones para conocer más acerca del comportamiento de la transferencia de masa y calor que ocurre dentro de la cámara del secado por aspersión, es el estudio a nivel microscópico del proceso. Además, se recomienda realizar un estudio paramétrico con condiciones de aire de una ciudad cercana a una costa, para un conocimiento preciso de la cantidad de aire seco requerido y el agua condensada que se podría obtener.

---

## CAPÍTULO 6

### BIBLIOGRAFÍA

- (SENER), S. d. E. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*.
- Alameddine, I., & El-Fadel, M. (2007). Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design. *Desalination*, 214, 241-260. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.103>
- Arreguín Cortés, F., & Martín Domínguez, A. (2000). Desalinización del agua.
- Boluda Botella, N., & Egea Llopis, E. (2017). Evaluación del impacto medioambiental de los vertidos al mar de aguas depuradas. Adsorción de metales y tensioactivos aniónicos en sedimentos de la costa alicantina. *Holothuria tubulosa* como bioindicador de contaminación.
- Chen, Q., Ja, M. K., Li, Y., & Chua, K. J. (2018). Energy, economic and environmental (3E) analysis and multi-objective optimization of a spray-assisted low-temperature desalination system. *Energy*, 151, 387-401.
- Chen, Q., Thu, K., Bui, T. D., Li, Y., Ng, K. C., & Chua, K. J. (2016). Development of a model for spray evaporation based on droplet analysis. *Desalination*, 399, 69-77.
- De la Cruz, C. (2006). *La desalinización de agua de mar mediante el empleo de energías renovables*. Fundación Alternativas.
- De la Fuente, J. A., Ovejero, M., & Queralt Mitjans, I. (2008). Gestión medioambiental de salmueras en plantas de desalación marina. *Geo-Temas*, 1128, 1125-1128.
- Durán, A. (2018). INEGI asegura que 44 millones de mexicanos se encuentran sin agua en sus hogares. *El Sol de México*.
- Dévora-Isiordia, G. E., & Astorga-Trejo, S. (2018). Afectación del nivel de concentración del agua de mar, por vertidos de plantas desaladoras en Sonora. 9(1), 99-106.
- Dévora-Isiordia, G. E., González-Enríquez, R., & Ruiz-Cruz, S. (2013). EVALUACIÓN DE PROCESOS DE DESALINIZACIÓN Y SU DESARROLLO EN MÉXICO. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(3), 27-46.

- Dévora-Isiordia, G. E., Lizárraga, A., Fimbres Weihs, G., & Álvarez-Sánchez, J. (2017). COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DESCARGA PARA VERTIDOS DE SALMUERAS, PROVENIENTES DE UNA PLANTA DESALINIZADORA EN SONORA, MÉXICO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 45-54. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp02.04>
- El-Bahi, A., & Inan, D. (1999). A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser. *Desalination*, 123(1), 79-83.
- Gacía, E., & Ballesteros, E. (2001). El impacto de las plantas desalinizadoras sobre el medio marino: la salmuera en las comunidades bentónicas mediterráneas.
- Gacía, E., & Ballesteros, E. (2001). El impacto de las plantas desalinizadoras sobre el medio marino: la salmuera en las comunidades bentónicas mediterráneas.
- Ghalavand, Y., Hatamipour, M. S., & Rahimi, A. (2015). A review on energy consumption of desalination processes. *Desalination and Water Treatment*, 54(6), 1526-1541.
- González, E. R., & Dévora, G. E. (2009). Funcionamiento y contaminación generada por plantas desalinizadoras ubicadas en las zonas del mar de Cortés y mar Caribe: un estudio para el desarrollo de normatividad ambiental acuática. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 5(2), 186-197.
- Hamawand, I., Lewis, L., Ghaffour, N., & Bundschuh, J. (2017). Desalination of salty water using vacuum spray dryer driven by solar energy [Article]. *Desalination*, 404, 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.11.015>
- Heck, N., Paytan, A., Potts, D. C., & Haddad, B. (2016). Predictors of local support for a seawater desalination plant in a small coastal community. *Environmental Science & Policy*, 66, 101-111.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.
- [Record #38 is using a reference type undefined in this output style.]
- Keshani, S., Daud, W. R. W., Nourouzi, M. M., Namvar, F., & Ghasemi, M. (2015). Spray drying: An overview on wall deposition, process and modeling. *Journal of Food Engineering*, 146, 152-162.
- Kim, B., Kwak, R., Kwon, H. J., Pham, V. S., Kim, M., Al-Anzi, B., Lim, G., & Han, J. (2016). Purification of high salinity brine by multi-stage ion concentration polarization desalination. *Scientific reports*, 6, 31850.

- Lechuga, J., Rodríguez, M., & Lloveras, J. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. *Ingeniería*, 11(3).
- López Hernández, O. D. (2010). Microencapsulación de sustancias oleosas mediante secado por aspersion. *Revista Cubana de Farmacia*, 44(3), 381-389.
- Moita, R. D., Matos, H. A., Fernandes, C., Nunes, C. P., & Pinho, M. J. (2009). Dynamic modelling and simulation of a heated brine spray system. *Computers and Chemical Engineering*, 33(8), 1323-1335. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.01.016>
- Morillo, J., Usero, J., Rosado, D., El Bakouri, H., Rianza, A., & Bernaola, F.-J. (2014). Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination*, 336, 32-49.
- Moya, E. Z. (1997). Desalinización del agua del mar mediante energías renovables.
- Palomar Herrero, P., & Losada Rodríguez, Í. (2008). Desalinización de agua marina en España: aspectos a considerar en el diseño del sistema de vertido para protección del medio marino.
- Panagopoulos, A., Haralambous, K.-J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies-A review. *Science of The Total Environment*.
- Quevedo Albuquerque, M., & Rosales Samillán, D. D. (2009). Análisis y optimización de los parámetros para desalación de agua de mar mediante osmosis inversa en la refinería de petroperú de la ciudad de Talara.
- Riera, R., Tuya, F., Sacramento, A., Ramos, E., Monterroso, Ó., & Rodríguez, M. (2013). Influence of the combined disposal of sewage and brine on meiofauna. *Ciencias Marinas*, 39(1), 15-27.
- Solís Hernández, A. (2015). Eficiencia energética en el prediseño de plantas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de la Energía* (pp. 95).
- Tanaka, H. (2009). Experimental study of vertical multiple-effect diffusion solar still coupled with a flat plate reflector. *Desalination*, 249(1), 34-40.
- Tiwari, A. K., & Tiwari, G. N. (2006). Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition. *Desalination*, 195(1-3), 78-94.

- Torquemada, Y. F., Correa, J. M. G., Giménez, A. C., & Lizaso, J. L. S. (2004). MEDIDAS DE ATENUACIÓN DEL POSIBLE IMPACTO AMBIENTAL DEL VERTIDO DE LAS DESALADORAS DE OSMOSIS INVERSA: EL EJEMPLO DE JÁVEA (ALICANTE).
- Younos, T. (2005). Environmental issues of desalination. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 132(1), 11-18.
- Zarzo Martinez, D., & Campos Pozuelo, E. (2011). Project for the development of innovative solutions for brines from desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 31(1-3), 206-217.

## ANEXOS

### Anexo A: Tabla límites máximos permisibles para los vertidos de la salmuera de las plantas desalinizadoras.

Tabla 1. Límites máximos permisibles para composición iónica.

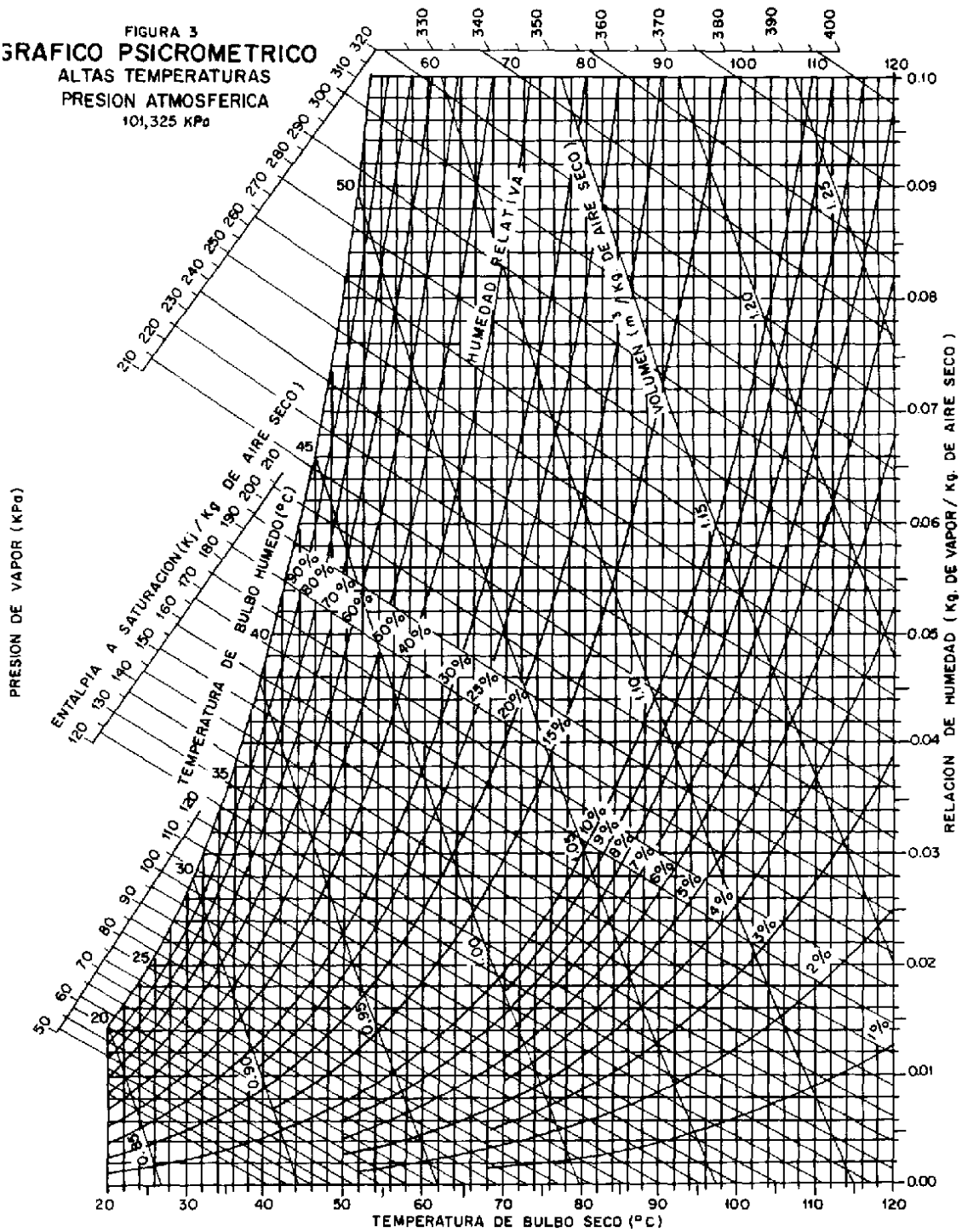
Parámetros (mg l <sup>-1</sup> excepto cuando se especifica)	Ríos			Embalses naturales y artificiales			Aguas costeras		Humedales naturales (B)	Pozos de inyección profunda	Alcantarillado público
	Uso en riego agrícola (A)	Uso público urbano(B)	Protección de vida acuática (C)	Uso en riego agrícola (B)	Uso público urbano (C)	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)	Recreación (B)	Estuario (B)			
Bicarbonatos	(I) 5	(I) 5	(I) 4	(I) 5	(I) 4	(I) 200	(I) 400	(I) 180	(I) 180	(I) 400	(I) 10
Calcio	15	15	12	15	12	500	800	500	500	1000	20
Cloruros (como Cl)	750	700	500	720	500	25000	36000	24000	24000	50000	1000
Flúor	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.7	2.5	1.5	1.5	3.5	-
Magnesio	50	45	40	50	40	1700	2400	1600	1600	3500	80
pH	5-8	5-10	-	5-8	5-10	5-10	8	5-10	5-10	4 – 10	5.5-10
Potasio	15	15	12	15	12	500	750	500	500	1000	20
Sodio	415	380	350	400	350	14000	20000	13000	13000	28000	650
Sólidos disueltos totales (SDT)	1350	1250	1100	1300	1100	45000	65000	43000	43000	90000	2000
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> )	100	90	80	100	80	3500	5000	3500	3500	7000	400

Donde: (I) Instantáneo; (-) Sin dato; y (A), (B) y (C) Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos.

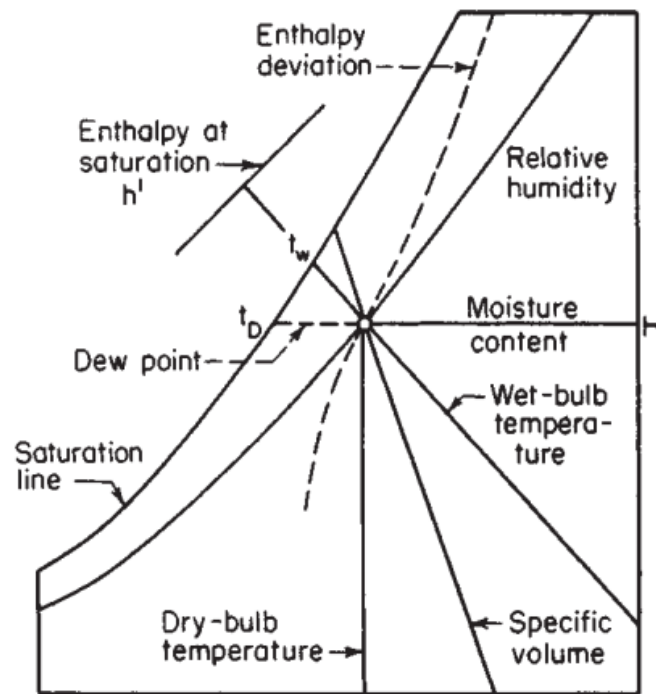
Tabla obtenida de: (González & Dévora, 2009)

## Anexo B. Carta psicrométrica

FIGURA 3  
**GRAFICO PSICROMETRICO**  
 ALTAS TEMPERATURAS  
 PRESION ATMOSFERICA  
 101,325 kPa



**Anexo C: Diagrama que muestra la ubicación de los parámetros de la carta psicrométrica**



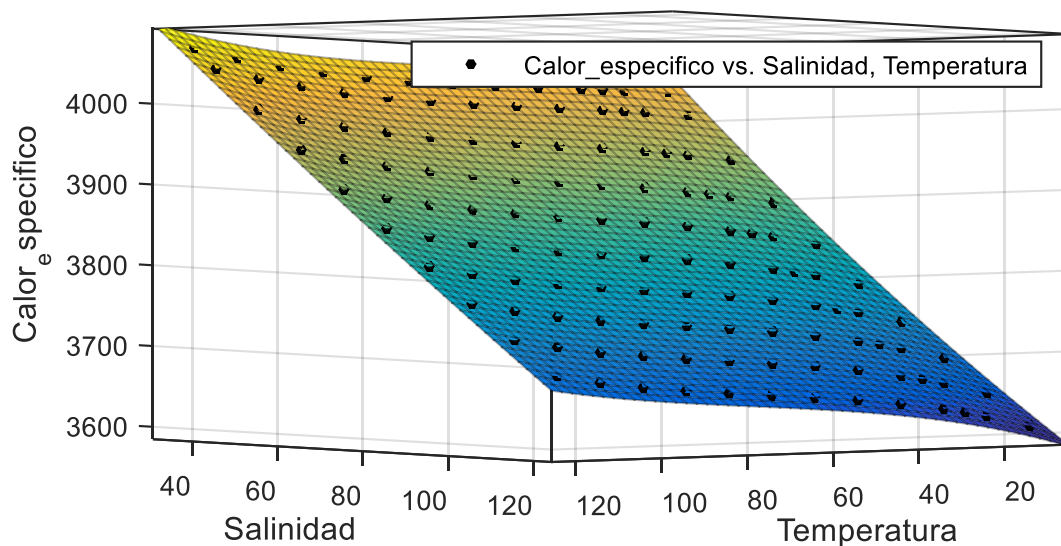
**FIG. 12-6** Diagram of psychrometric chart showing the properties of moist air.

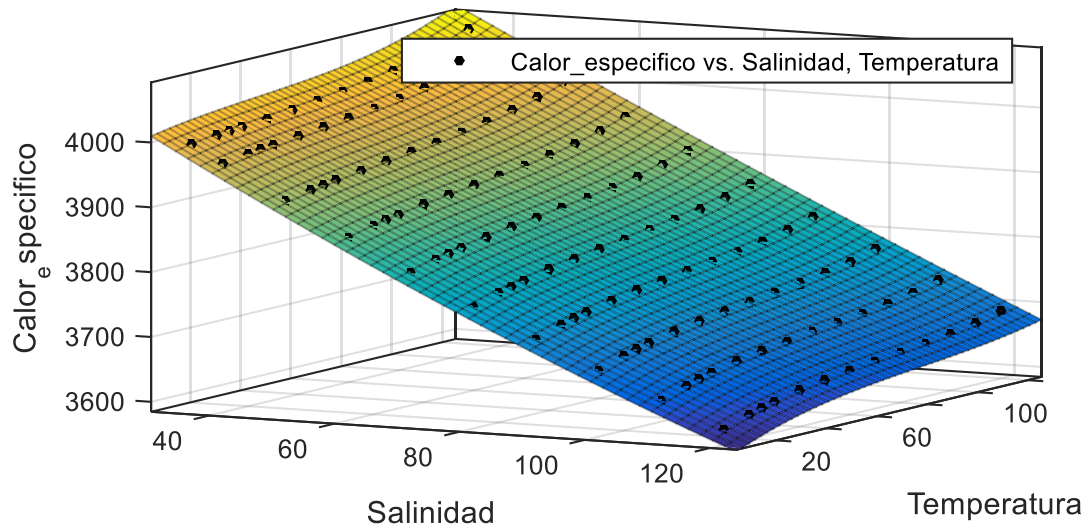


## Anexo D: Calor específico de la salmuera en función de la salinidad y la temperatura, J/kg K

Se obtuvo un modelo polinomial en Matlab, con los siguientes datos:

Temperatura (°C)	Salinidad, g/kg									
	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120
10	3994.9	3968.1	3915.9	3865.8	3817.7	3771.6	3727.6	3685.6	3645.6	3607.7
20	3998.9	3973.4	3923.6	3875.4	3828.9	3784.1	3740.9	3699.4	3659.6	3621.4
25	4000.8	3975.8	3926.9	3879.5	3833.7	3789.3	3746.5	3705.2	3665.4	3627.1
30	4002.6	3978	3930	3883.3	3837.9	3794	3751.4	3710.3	3670.5	3632.1
40	4006.2	3982.3	3935.5	3889.8	3845.3	3801.9	3759.8	3718.8	3678.9	3640.2
50	4010	3986.6	3940.5	3895.5	3851.5	3808.5	3766.5	3725.5	3685.5	3646.5
60	4014.4	3991.2	3945.6	3900.8	3857	3814.1	3772.1	3731	3690.8	3651.6
70	4019.6	3996.5	3950.9	3906.2	3862.4	3819.4	3777.2	3736	3695.5	3656
80	4026	4002.8	3957.1	3912.2	3868.1	3824.9	3782.5	3740.9	3700.2	3660.3
90	4033.9	4010.5	3964.4	3919.1	3874.7	3831.1	3788.3	3746.4	3705.3	3665.1
100	4043.6	4019.9	3973.3	3927.5	3882.6	3838.6	3795.4	3753.1	3711.6	3671.1
110	4055.4	4031.4	3984.2	3937.8	3892.4	3847.9	3804.3	3761.5	3719.7	3678.8
120	4069.6	4045.3	3997.5	3950.5	3904.6	3859.5	3815.4	3772.3	3730.1	3688.8





Modelo polinomial:  $f(x,y) = p00 + p10x + p01y + p20x^2 + p11xy + p02y^2 + p21x^2y + p12xy^2 + p03y^3$

Coefficientes:

$$p00 = 4180.61703328632$$

$$p10 = -5.93896078076532$$

$$p01 = 0.394020548188829$$

$$p20 = 0.0084482230707098$$

$$p11 = 0.0177499773929197$$

$$p02 = -0.0089656520652832$$

$$p21 = -0.00004371971942464$$

$$p12 = -0.0000832644446510934$$

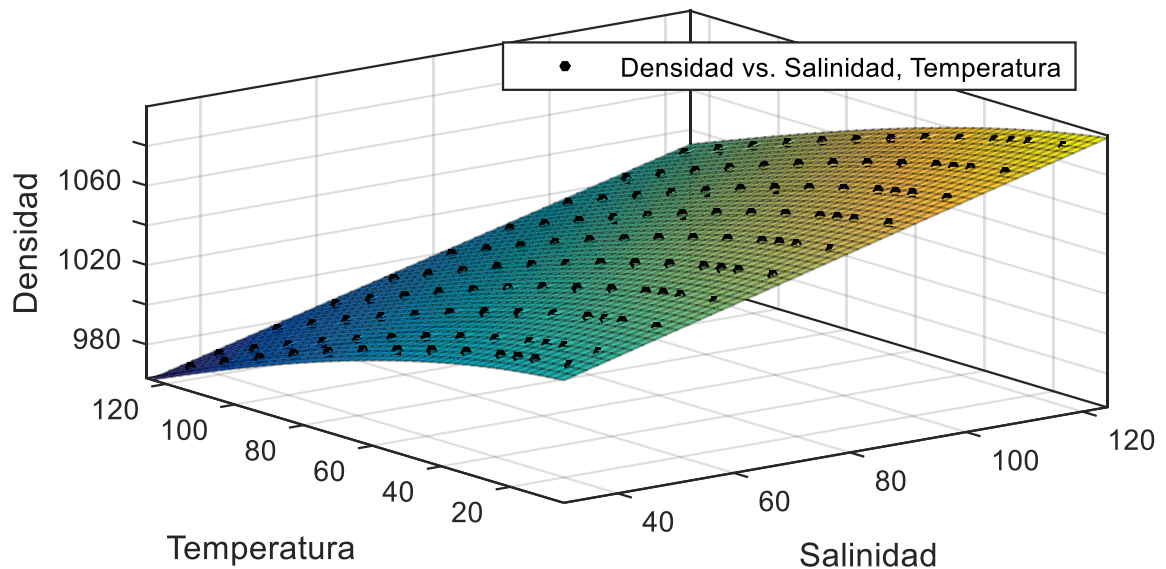
$$p03 = 0.0000821276148641631$$

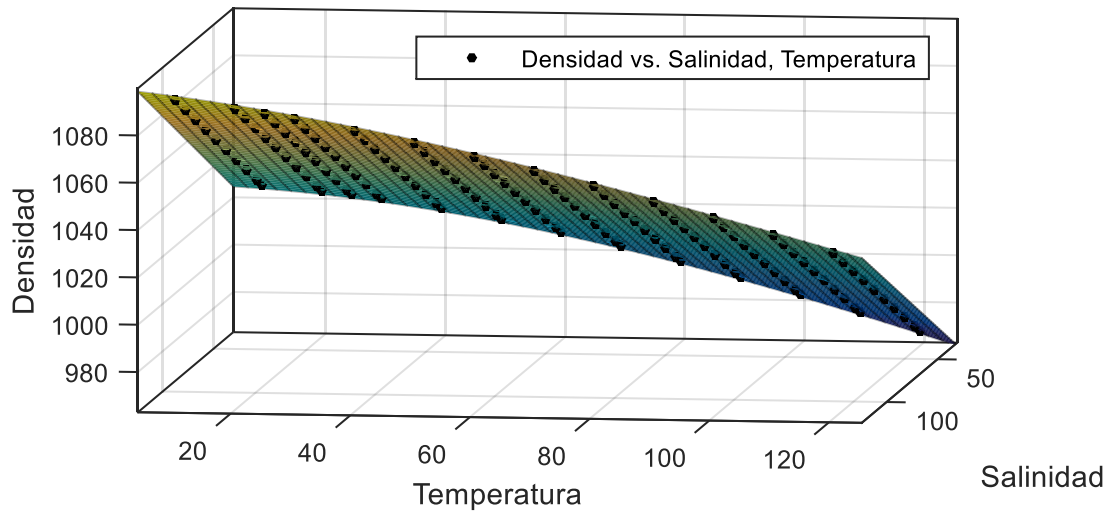
$$R^2 = 1$$

## Anexo E: Densidad de la salmuera en función de la salinidad y la temperatura, kg/m<sup>3</sup>

Se obtuvo un modelo polinomial en Matlab, con los siguientes datos:

Temperatura (°C)	Salinidad, g/kg									
	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120
10	1027	1030.9	1038.7	1046.6	1054.4	1062.2	1070.1	1077.9	1085.7	1093.6
20	1024.9	1028.8	1036.5	1044.1	1051.8	1059.5	1067.2	1074.9	1082.6	1090.3
25	1023.6	1027.4	1035	1042.6	1050.3	1057.9	1065.5	1073.1	1080.7	1088.4
30	1022	1025.8	1033.4	1040.9	1048.5	1056.1	1063.6	1071.2	1078.7	1086.3
40	1018.3	1022.1	1029.5	1037	1044.5	1052	1059.4	1066.9	1074.4	1081.8
50	1014	1017.7	1025.1	1032.5	1039.9	1047.3	1054.7	1062.1	1069.5	1076.9
60	1009	1012.7	1020	1027.4	1034.7	1042.1	1049.5	1056.8	1064.2	1071.5
70	1003.5	1007.1	1014.5	1021.8	1029.1	1036.5	1043.8	1051.2	1058.5	1065.8
80	997.5	1001.1	1008.5	1015.8	1023.1	1030.5	1037.8	1045.1	1052.5	1059.8
90	991	994.7	1002	1009.4	1016.8	1024.1	1031.5	1038.8	1046.2	1053.5
100	984.2	987.9	995.2	1002.6	1010	1017.4	1024.8	1032.2	1039.6	1047
110	976.9	980.6	988.1	995.5	1003	1010.4	1017.8	1025.3	1032.7	1040.2
120	969.3	973.1	980.6	988.1	995.6	1003.1	1010.6	1018.1	1025.6	1033.1





Modelo polinomial:  $f(x,y) = p00 + p10x + p01y + p20x^2 + p11xy + p02y^2 + p21x^2y + p12xy^2 + p03y^3$

Coefficientes:

$$p00 = 1000.56250859099$$

$$p10 = 0.797311857712094$$

$$p01 = -0.0369094104435864$$

$$p20 = 2.62219968051087E-06$$

$$p11 = -0.00167141671162776$$

$$p02 = -0.00468387473785908$$

$$p21 = -2.07370528171639E-08$$

$$p12 = 0.0000107781848165137$$

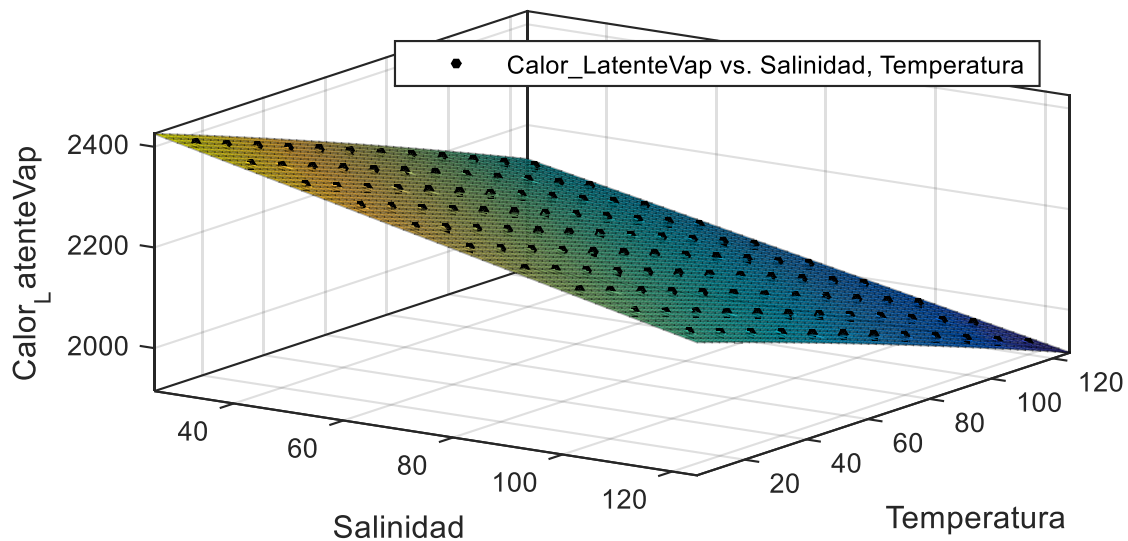
$$p03 = 8.28188320309265E-06$$

$$R^2 = 1$$

## Anexo F: Calor latente de vaporización de la salmuera en función de la salinidad y la temperatura, kJ/kg

Se obtuvo un modelo polinomial en Matlab, con los siguientes datos:

Temperatura (°C)	Salinidad, g/kg									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
10	2402.9	2378.1	2353.4	2328.6	2303.8	2279	2254.3	2229.5	2204.7	2180
20	2379.9	2355.4	2330.9	2306.3	2281.8	2257.3	2232.7	2208.2	2183.7	2159.1
30	2356.9	2332.6	2308.3	2284	2259.7	2235.4	2211.1	2186.8	2162.5	2138.2
40	2333.8	2309.7	2285.7	2261.6	2237.6	2213.5	2189.4	2165.4	2141.3	2117.3
50	2310.5	2286.7	2262.9	2239	2215.2	2191.4	2167.6	2143.8	2120	2096.1
60	2287	2263.4	2239.8	2216.2	2192.7	2169.1	2145.5	2121.9	2098.3	2074.8
70	2263.1	2239.8	2216.4	2193.1	2169.8	2146.4	2123.1	2099.8	2076.5	2053.1
80	2238.8	2215.8	2192.7	2169.6	2146.5	2123.4	2100.4	2077.3	2054.2	2031.1
90	2214.1	2191.3	2168.4	2145.6	2122.8	2100	2077.1	2054.3	2031.5	2008.7
100	2188.8	2166.2	2143.7	2121.1	2098.5	2076	2053.4	2030.8	2008.3	1985.7
110	2162.8	2140.5	2118.2	2095.9	2073.6	2051.3	2029	2006.7	1984.4	1962.1
120	2136.1	2114.1	2092	2070	2048	2026	2003.9	1981.9	1959.9	1937.9



Modelo polinomial:  $f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2$

Coeficientes:

$$p_{00} = 2499.5941184573$$

$$p_{10} = -2.50524443296601$$

$$p_{01} = -2.25913845245667$$

$$p_{20} = 3.47222222219624E-06$$

$$p_{11} = 0.00248510277601195$$

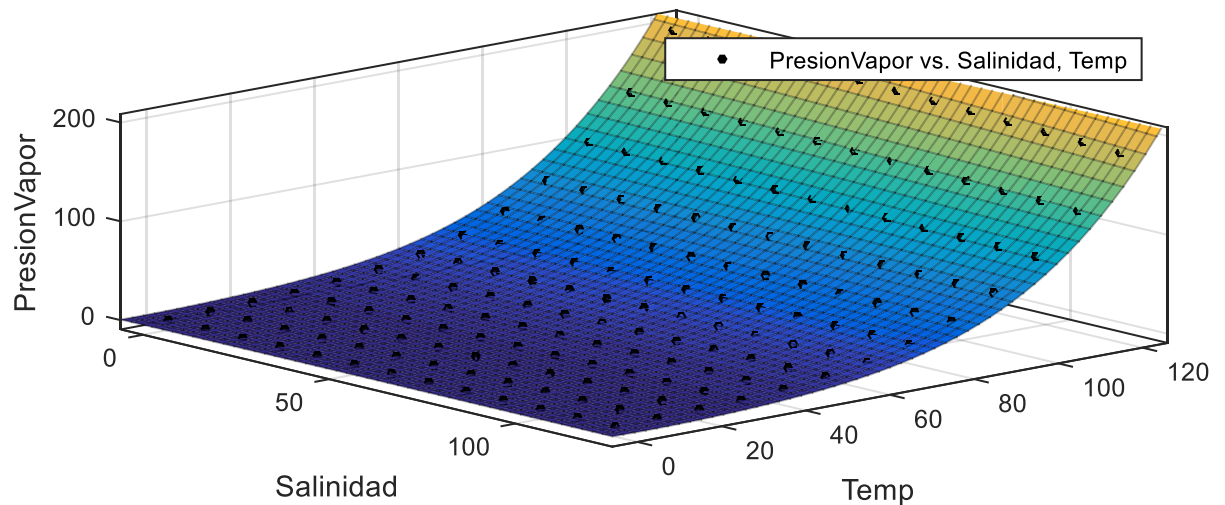
$$p_{02} = -0.00176228771228754$$

$$R^2 = 1$$

## Anexo G: Presión de vapor saturado de la salmuera en función de la salinidad y la temperatura, kPa

Se obtuvo un modelo polinomial en Matlab, con los siguientes datos:

Temperatura (°C)	Salinidad, g/kg									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
10	0.602	0.598	0.594	0.59	0.586	0.582	0.577	0.572	0.567	0.562
20	1.209	1.202	1.194	1.186	1.177	1.168	1.159	1.149	1.139	1.129
30	2.303	2.289	2.274	2.259	2.242	2.225	2.207	2.189	2.17	2.149
40	4.18	4.155	4.129	4.101	4.071	4.04	4.008	3.974	3.939	3.902
50	7.269	7.226	7.179	7.131	7.079	7.025	6.969	6.91	6.849	6.786
60	12.159	12.086	12.009	11.927	11.841	11.751	11.656	11.558	11.456	11.35
70	19.635	19.518	19.393	19.261	19.122	18.976	18.824	18.665	18.5	18.329
80	30.715	30.531	30.336	30.129	29.912	29.684	29.446	29.198	28.94	28.672
90	46.678	46.399	46.102	45.788	45.457	45.111	44.749	44.372	43.98	43.573
100	69.095	68.681	68.241	67.776	67.287	66.775	66.239	65.681	65.1	64.499
110	99.85	99.252	98.616	97.945	97.239	96.498	95.723	94.916	94.078	93.208
120	141.166	140.32	139.422	138.473	137.474	136.426	135.332	134.191	133.005	131.776



Modelo polinomial:  $f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3 + p_{13}xy^3 + p_{04}y^4$

Coeficientes:

$$p_{00} = 0.973965197428797$$

$$p_{10} = 0.00424956841138597$$

$$p_{01} = -0.023269074238047$$

$$p_{11} = -0.000546422802786434$$

$$p_{02} = 0.00527393432262176$$

$$p_{12} = 0.0000139421467421468$$

$$p_{03} = -0.0000589461694450329$$

$$p_{13} = -1.6388406206588E-07$$

$$p_{04} = 1.09939831002331E-06$$

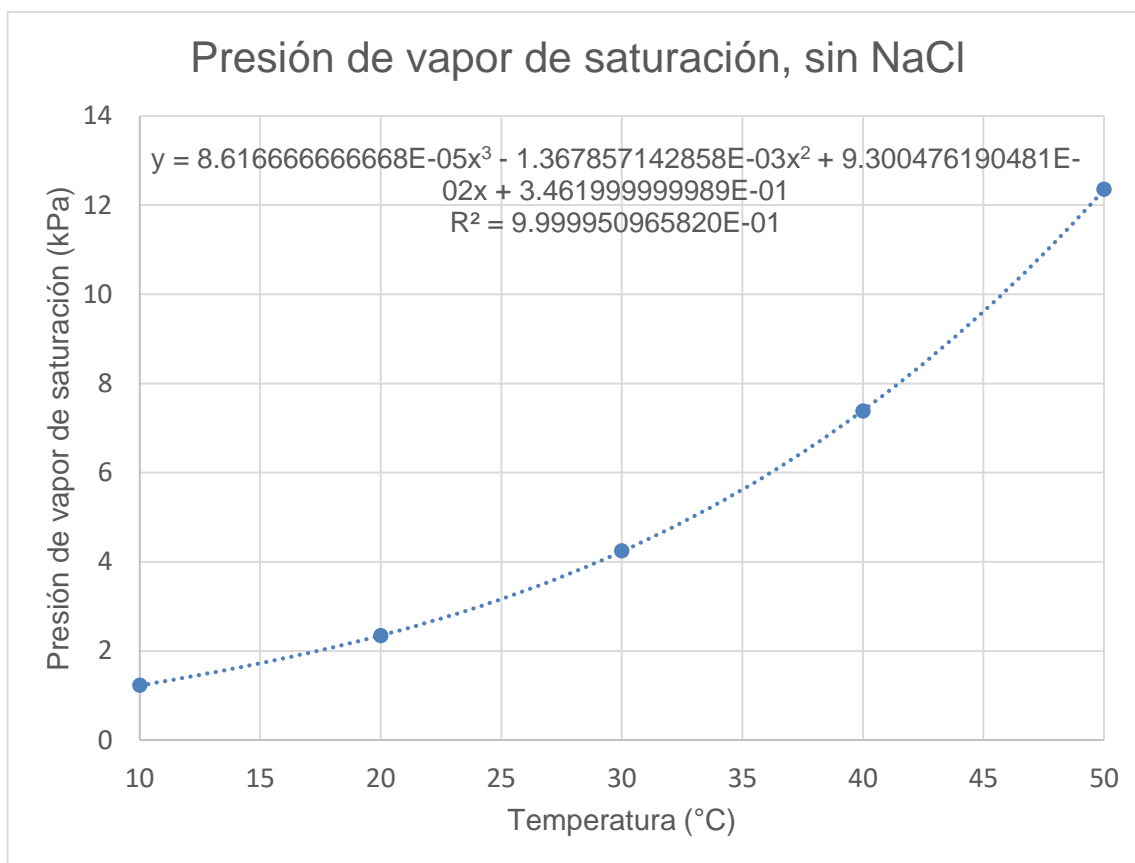
$$R^2 = 1$$



## Anexo H: Presión de vapor saturado del agua sin NaCl en función de la temperatura, kPa

Se obtuvo un modelo polinomial en Excel, con los siguientes datos:

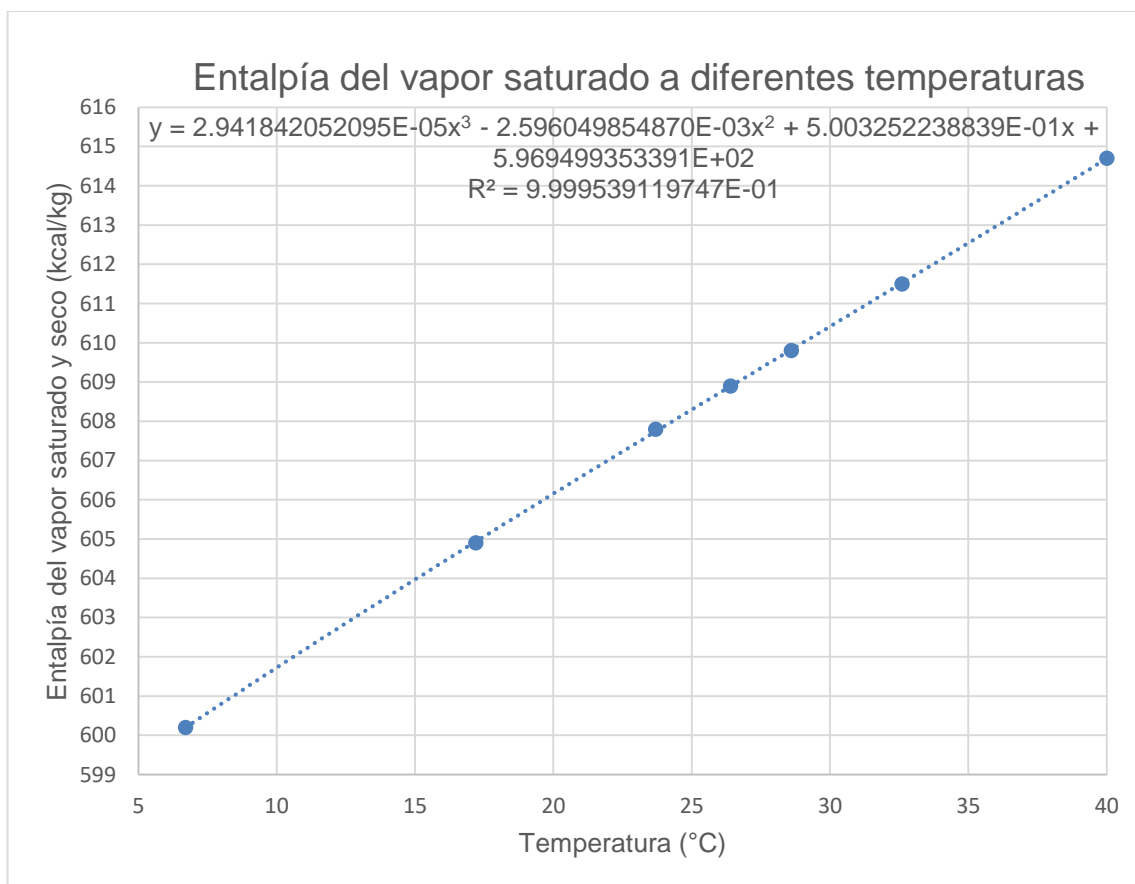
Temperatura (°C)	Presión de vapor saturado (kPa)
10	1.228
20	2.339
30	4.246
40	7.383
50	12.35



## Anexo I: Entalpía del vapor saturado a diferentes temperaturas, kcal/kg

Se obtuvo un modelo polinomial en Excel, con los siguientes datos:

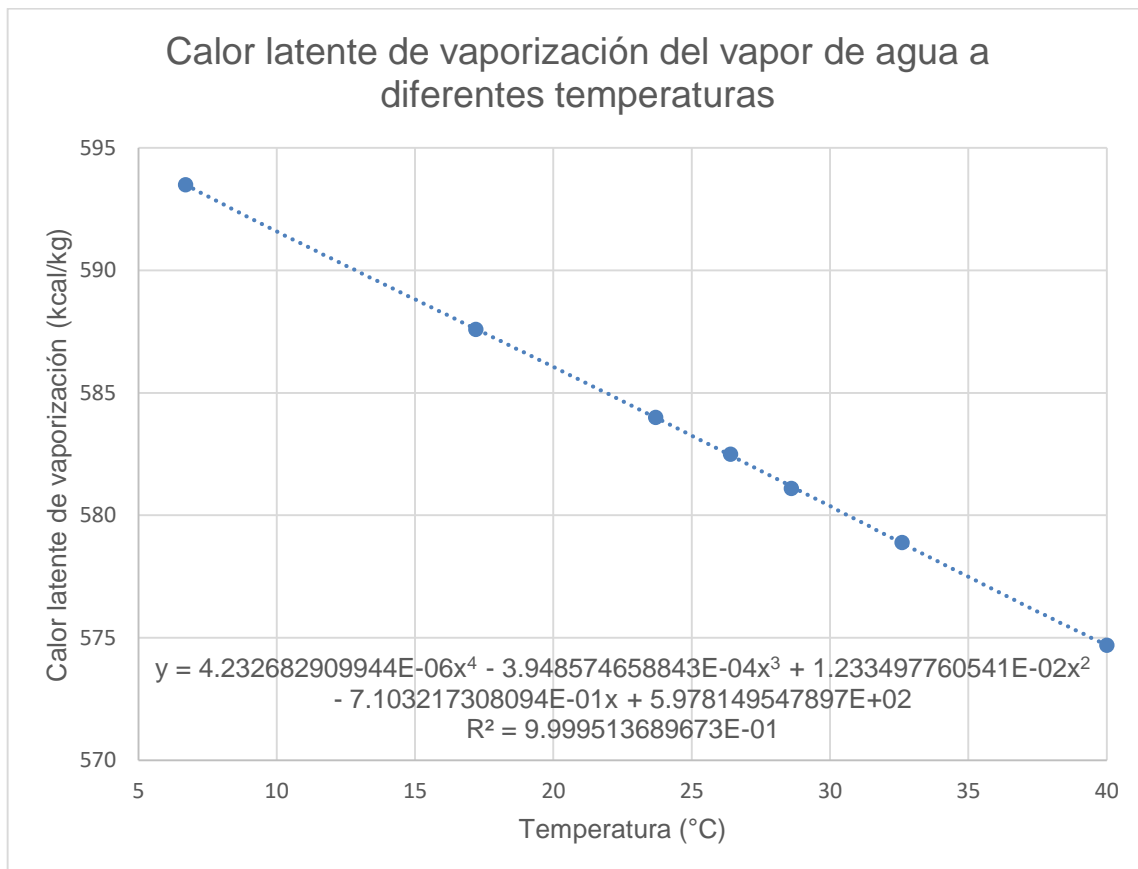
Temperatura (°C)	Entalpía del vapor saturado (kcal/kg)
6.7	600.2
17.2	604.9
23.7	607.8
26.4	608.9
28.6	609.8
32.6	611.5
40	614.7



## Anexo J: Calor latente de vaporización a diferentes temperaturas, kcal/kg

Se obtuvo un modelo polinomial en Excel, con los siguientes datos:

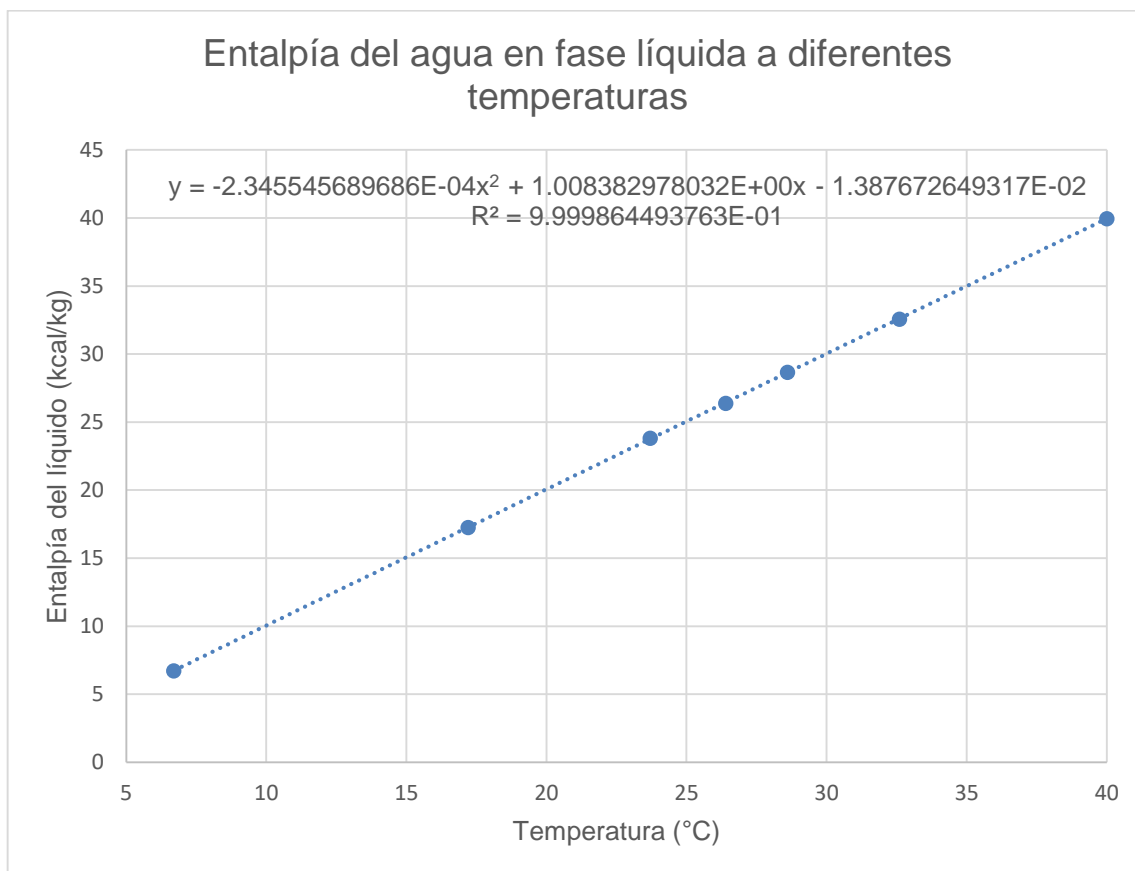
Temperatura (°C)	Calor latente de vaporización (kcal/kg)
6.7	593.5
17.2	587.6
23.7	584
26.4	582.5
28.6	581.1
32.6	578.9
40	574.7



## Anexo K: Entalpía del agua en estado líquido a diferentes temperaturas, kcal/kg

Se obtuvo un modelo polinomial en Excel, con los siguientes datos:

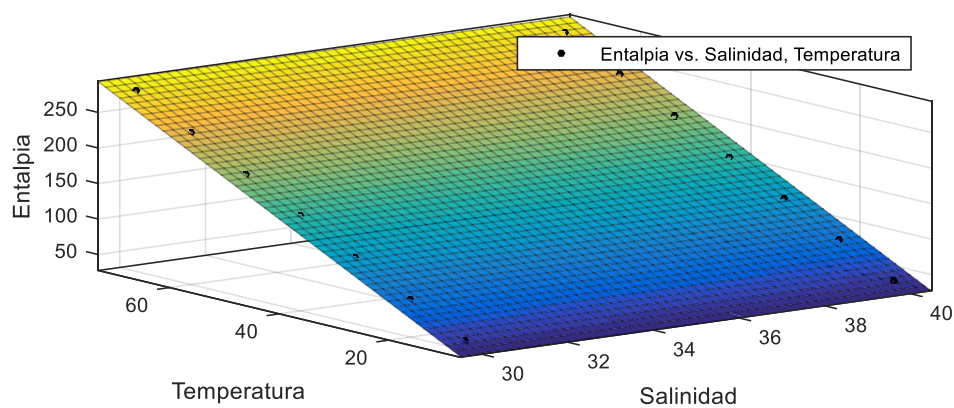
Temperatura (°C)	Calor latente de vaporización (kcal/kg)
6.7	6.73
17.2	17.25
23.7	23.81
26.4	26.39
28.6	28.67
32.6	32.57
40	39.96



## Anexo L: Entalpía del agua de mar en función de la salinidad y la temperatura, kJ/kg

Se obtuvo un modelo polinomial en Matlab, con los siguientes datos:

Temperatura (°C)	Salinidad, g/kg	
	30	40
10	40.4	39.7
20	80.4	79.2
30	120.6	118.9
40	160.8	158.6
50	201.2	198.5
60	241.6	238.5
70	282	278.5



Modelo polinomial:  $f(x, y) = p00 + p10x + p01y$

Coefficientes:

$$p00 = 7.3$$

$$p10 = -0.2157142857142857$$

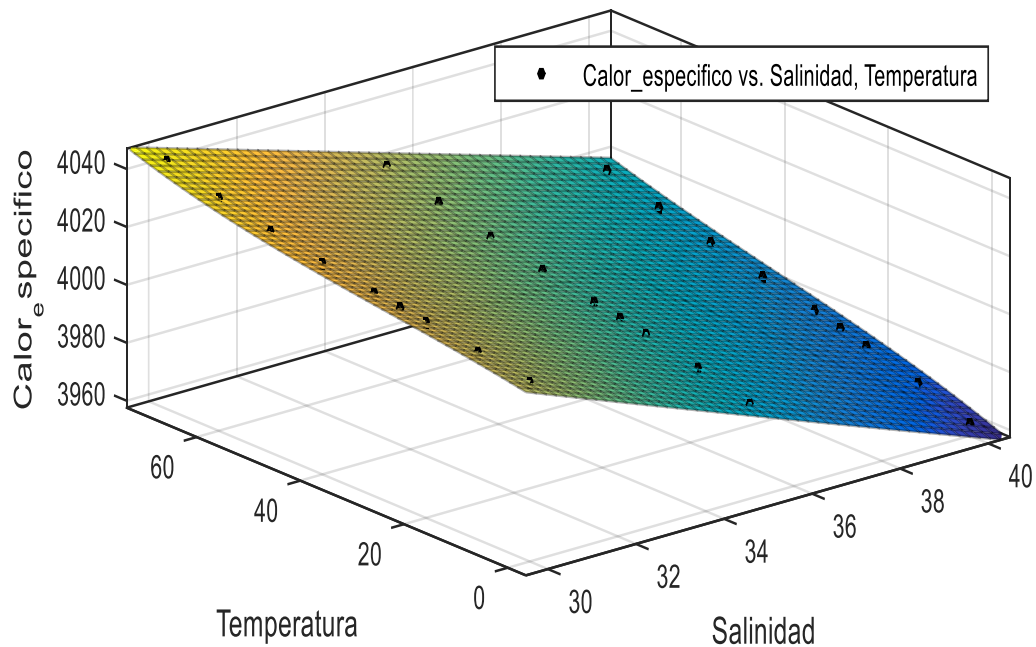
$$p01 = 4.0042857142857142857$$

$$R^2 = 1$$

## Anexo M: Calor específico del agua de mar en función de la salinidad y la temperatura, J/kg K

Se obtuvo un modelo polinomial en Matlab, con los siguientes datos:

Temperatura (°C)	Salinidad, g/kg		
	30	35	40
10	4022.2	3994.9	3968.1
20	4024.9	3998.9	3973.4
30	4026.2	4000.8	3975.8
40	4027.5	4002.6	3978
50	4030.3	4006.2	3982.3
60	4033.7	4010	3986.6
70	4037.8	4014.4	3991.2



Modelo polinomial:  $f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3$

Coeficientes:

$$p_{00} = 4202.78433683239$$

$$p_{10} = -6.44429508858962$$

$$p_{01} = -0.7534879181008$$

$$p_{20} = 0.0106027111574257$$

$$p_{11} = 0.039933635678253$$

$$p_{02} = 0.00381329466943532$$

$$p_{21} = -0.000107612095932265$$

$$p_{12} = -0.000247890473378151$$

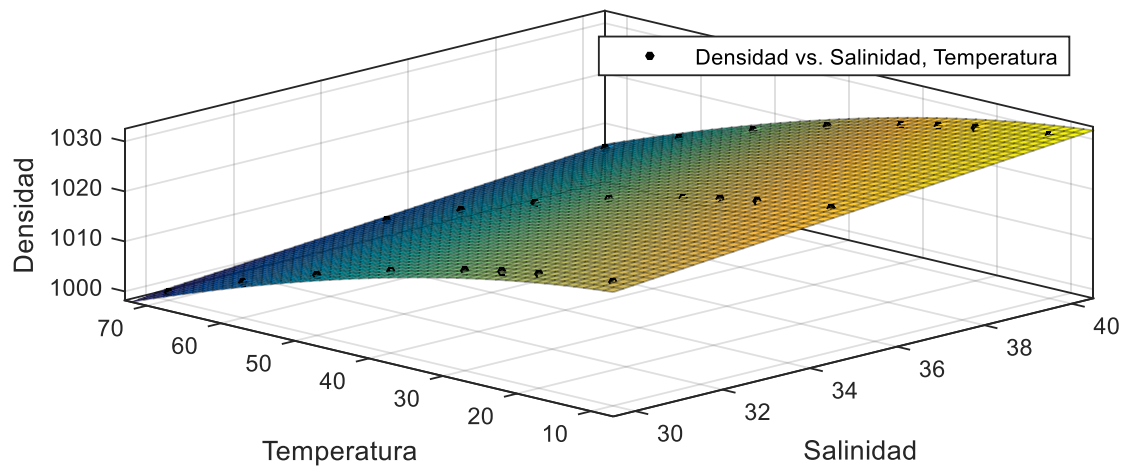
$$p_{03} = 0.000050610831103594$$

$$R^2 = 1$$

## Anexo N: Densidad del agua de mar en función de la salinidad y la temperatura, $\text{kg/m}^3$

Se obtuvo un modelo polinomial en Matlab, con los siguientes datos:

Temperatura (°C)	Salinidad, g/kg		
	30	35	40
10	1023	1027	1030.9
20	1021.1	1024.9	1028.8
30	1019.8	1023.6	1027.4
40	1018.2	1022	1025.8
50	1014.6	1018.3	1022.1
60	1010.3	1014	1017.7
70	1005.3	1009	1012.7





Modelo polinomial:  $f(x, y) = p00 + p10x + p01y + p11xy + p02y^2 + p12xy^2 + p03y^3$

Coeficientes:

$$p00 = 999.915350806244$$

$$p10 = 0.805192810733176$$

$$p01 = 0.00434616725604166$$

$$p11 = -0.00193599696227925$$

$$p02 = -0.00547183769562079$$

$$p12 = 0.0000129187410345044$$

$$p03 = 0.0000128525731879487$$

$$R^2 = 1$$