

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**“DESALINIZACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA CON ALTO CONTENIDO DE  
ARSÉNICO MEDIANTE UN SISTEMA DE DESTILACIÓN SOLAR”**

POR:

**ING. CRISTINA HERNÁNDEZ HERRERA**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

**ENERO DE 2019**



Desalinización de agua subterránea con alto contenido de arsénico mediante un sistema de destilación solar. Tesis presentada por Cristina Hernández Herrera como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:

**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

**M.I. Martha Lorena Calderón Fernández**  
Coordinador Académico

**Dra. María Socorro Espino Valdés**  
Director de Tesis

Enero de 2019

Comité:

**Dra. María Socorro Espino Valdés**  
**M.I. Javier González Cantú**  
**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
**Dra. María de Lourdes Ballinas Casarrubias**

© Derechos Reservados

**Cristina Hernández Herrera**

Circuito No. 1 Campus  
Universitario 2, Chihuahua, Chih.  
C.P. 31125

ENERO DE 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

14 de enero de 2019

**ING. CRISTINA HERNÁNDEZ HERRERA**

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dra. María Socorro Espino Valdés** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **"DESALINIZACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA CON ALTO CONTENIDO DE ARSÉNICO MEDIANTE UN SISTEMA DE DESTILACIÓN SOLAR"**.

**Índice**

**Dedicatoria**

**Agradecimientos**

**Resumen**

## **1. INTRODUCCIÓN**

- 1.1 Generalidades
- 1.2 Arsénico en el agua de consumo
- 1.3 Justificación
- 1.4 Objetivo
- 1.5 Hipótesis

## **2. MARCO TEÓRICO**

- 2.1 Agua subterránea
- 2.2 Características del agua potable
- 2.3 Origen del arsénico en el agua
- 2.4 Métodos para remoción de arsénico del agua
- 2.5 Destilación solar

## **3. METODOLOGÍA**

- 3.1 Descripción del área de estudio
- 3.2 Análisis del sistema
- 3.3 Acondicionamiento del sistema
- 3.4 Procedimiento experimental

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados en la Etapa I: periodo de prueba con agua potable

4.2 Análisis de resultados en la Etapa II: operación del sistema con agua de Julimes

#### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.3 Conclusiones

5.4 Recomendaciones

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
*"Naturam subiecit aliis"*

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
U.A.C.H.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

## DEDICATORIA

*A mi hijo, por quien todo vale la pena.*

*A Lucio, mi compañero de vida.*

*A mis padres, ejemplo de entrega, fortaleza y dedicación.*

## **Agradecimientos**

Primero que nada quiero agradecer a mi padres, Manuel y María Candelaria, sin su apoyo y sin sus consejos no hubiera llegado hasta donde estoy, gracias por luchar conmigo, por estar siempre para mí.

A mis hermanos Karen, Manuel y Mariel, gracias por todo su apoyo, por estar siempre conmigo.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, por la formación académica recibida y por el apoyo para la realización de esta tesis.

A la Dra. María Socorro Espino Valdés, directora de esta tesis, por su amistad, por todo su apoyo a lo largo de este proceso, por sus consejos, por su tiempo y paciencia, por compartir sus conocimientos y creer en mí, gracias.

Al Dr. Alejandro Villalobos Aragón, por su apoyo durante toda mi formación académica, gracias por tener siempre un consejo a lo largo de todos estos años, por su amistad, gracias.

A todas las personas que desinteresadamente colaboraron en la realización de esta tesis.

Y en especial al Ingeniero Lucio Rivas Lobera, próximo maestro en Ingeniería, gracias por el apoyo en la realización de la tesis, por ayudarme con las modificaciones al destilador, por desvelarte conmigo y aguantarme siempre que el estrés me ganaba, por ser mi eterno compañero de aula, pero sobre todo por ser mi compañero de vida, gracias por estar ahí siempre, fijando metas juntos y llevándolas a cabo, esta tal vez la última que compartamos académicamente, pero la primera de muchas que aún tenemos pendientes. ¡Segunda meta superada!, y como hace más de dos años, ahora lo que sigue...

## RESUMEN

Hoy en día la escasez de agua es uno de los principales retos a los que se enfrenta la humanidad. Esto debido a su importancia a nivel biológico y social. En las regiones áridas, la principal fuente de abastecimiento es el agua subterránea, sin embargo en estas zonas se suelen encontrar problemas con la calidad de la misma, derivados de distintos factores tanto naturales como antropogénicos. El arsénico se presenta de manera natural en las aguas subterráneas. La exposición crónica a este elemento provoca efectos adversos a la salud, es por eso por lo que la norma oficial mexicana para agua potable establece un límite máximo permitido de 0.025mg/l. El presente proyecto se enfoca en la destilación solar como una tecnología para la desalinización de agua subterránea con alto contenido de arsénico. La metodología constó de dos etapas: en la primera se destiló agua de la ciudad de Chihuahua, hasta que los parámetros medidos *in situ* a las muestras que son conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT), tuvieron una variación diaria mínima. En la segunda etapa, se prosiguió con la selección de tres pozos con alto contenido de arsénico (As) y flúor (F) ubicados en el municipio de Julimes; posteriormente se destiló agua de estos tres pozos durante los meses de agosto y septiembre, periodo durante el cual se realizó un registro climatológico y se midió la temperatura en el equipo (temperatura externa, temperatura del vapor de agua y temperatura del agua en el sistema). Las muestras obtenidas en la segunda etapa del proyecto se analizaron para distintos parámetros, entre ellos CE, SDT, As y F. Se demostró que el equipo de destilación solar mejora la calidad del agua subterránea, presentando un porcentaje de remoción de arsénico de más del 99%, del flúor más del 96% y los sólidos disueltos totales y la conductividad eléctrica se redujeron más del 98%. Estos parámetros y los demás medidos en las muestras, están por debajo de los límites permisibles establecidos en la norma oficial mexicana para agua potable.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	1
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
1.1 Generalidades.....	8
1.2 Arsénico en el agua de consumo.....	9
1.3 Justificación.....	13
1.4 Objetivo.....	15
1.5 Hipótesis.....	15
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>16</b>
2.1 Agua subterránea.....	16
2.1.1 Constituyentes del agua subterránea.....	18
2.1.2 Usos del agua subterránea.....	20
2.2 Características del agua potable.....	22
2.2.1 Estándares del agua potable.....	22
2.2.2 Normatividad para agua potable en México.....	23
2.3 Origen del arsénico en el agua.....	24
2.4 Métodos para remoción de arsénico del agua.....	25
2.5 Destilación solar.....	31
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>38</b>
3.1 Descripción del área de estudio.....	38
3.2 Análisis del sistema.....	43
3.2.1 Descripción del destilador solar.....	43
3.2.2 Ubicación del área de trabajo.....	44
3.3 Acondicionamiento del sistema.....	45
3.3.1 Selección de materiales.....	46
3.3.2 Modificación del equipo.....	46
3.4 Procedimiento experimental.....	48
3.4.1 Inicio de la operación del destilador.....	48

3.4.2 Pruebas preliminares con agua potable de la ciudad de Chihuahua.....	50
3.4.3 Traslado de agua con arsénico procedente del municipio de Julimes.....	50
3.4.4 Operación del destilador con agua de pozos de Julimes.....	51
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
4.1 Análisis de resultados en la Etapa I: periodo de prueba con agua potable.....	54
4.2 Análisis de resultados en la Etapa II: operación del sistema con agua de Julimes.....	56
4.2.1 Análisis del destilado San José.....	56
4.2.2 Análisis del destilado La Regina.....	63
4.2.3 Análisis del destilado La Esperanza.....	68
4.2.4 Resumen de resultados.....	74
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
5.3 Conclusiones.....	75
5.4 Recomendaciones.....	75
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1.	Acuífero Meoqui- Delicias en el estado de Chihuahua.....	12
2.1.	Etapas del ciclo hidrológico.....	17
2.2.	Distribución del agua dulce en el mundo.....	20
2.3.	Principio de la ósmosis inversa.....	28
2.4.	Esquema de un sistema de ósmosis inversa.....	29
2.5.	Espectro electromagnético solar.....	31
2.6.	Primera planta de destilación solar.....	33
2.7.	Principio de la destilación solar.....	34
2.8.	Destilador solar sencillo de una vertiente.....	35
3.1.	Ubicación del acuífero Meoqui- Delicias con respecto a los municipios del estado de Chihuahua.....	39
3.2.	Presencia de arsénico en el acuífero Meoqui- Delicias.....	40
3.3.	Localización del municipio de Julimes.....	41
3.4.	Esquema de un destilador solar de doble caseta.....	43
3.5.	Ubicación del destilador solar en la ciudad de Chihuahua.....	45
3.6.	Destilador solar en proceso de montaje en el año 2016.....	45
3.7.	Destilador solar con la modificación en su estructura.....	48
3.8.	Medidor portátil de CE y SDT.....	49
3.9.	Localización de pozos para colección de muestras.....	51
3.10.	Sensor de temperatura a base de termopares.....	52
4.1.	Valores de CE y SDT reportados en las muestras de la Etapa I.....	55

4.2.	Datos de CE medidos a las muestras San José.....	57
4.3.	Concentraciones de arsénico en las muestras San José.....	59
4.4.	Concentraciones de flúor en las muestras San José.....	59
4.5.	Variaciones diarias del volumen de destilado San José obtenido con relación a las temperaturas máximas y mínimas del ambiente.....	60
4.6.	Variación de temperatura en el destilador el día 19/08/2018.....	62
4.7.	Datos de CE medidos a las muestras La Regina.....	63
4.8.	Concentraciones de arsénico en las muestras La Regina.....	64
4.9.	Concentraciones de flúor en las muestras La Regina.....	65
4.10.	Variaciones diarias del volumen de destilado La Regina obtenido con relación a las temperaturas máximas y mínimas del ambiente.....	66
4.11.	Variación de temperatura en el destilador el día 14/08/2018.....	68
4.12.	Datos de CE medidos a las muestras La Esperanza.....	69
4.13.	Concentraciones de arsénico en las muestras La Esperanza.....	70
4.14.	Concentraciones de flúor en las muestras La Esperanza.....	70
4.15.	Variaciones diarias del volumen de destilado La Esperanza obtenido con relación a las temperaturas máximas y mínimas del ambiente...	71
4.16.	Variación de temperatura en el destilador el día 26/08/2018.....	73

## **ÍNDICE DE TABLAS**

1.1.	Características del agua producidas por diferentes compuestos químicos .....	9
1.2.	Resultados de calidad de agua en el municipio de Julimes.....	13
1.3.	Localidades en el municipio de Julimes con planta de ósmosis inversa .....	14
3.1.	Localidades en el municipio de Julimes.....	42
3.2.	Materiales utilizados para la modificación y rehabilitación del sistema .....	46
4.1.	Parámetros medidos en la Etapa 1.....	54
4.2.	Tabla de identificación de las muestras San José.....	56
4.3.	Resultados de CE y SDT medidos en distintos tipos de agua.....	57
4.4.	Resultados del análisis de calidad para las muestras San José.....	58
4.5.	Valores de parámetros climatológicos durante la destilación de agua del pozo San José.....	60
4.6.	Temperaturas medidas en el destilador para San José.....	61
4.7.	Identificación de las muestras La Regina.....	63
4.8.	Valores de parámetros climatológicos durante la destilación de agua del pozo La Regina.....	65
4.9.	Temperaturas medidas en el destilador para La Regina.....	67
4.10.	Tabla de identificación de las muestras La Esperanza.....	68

4.11.	Valores de parámetros climatológicos durante la destilación de agua del pozo La Esperanza .....	71
4.12.	Temperaturas medidas en el destilador para La Esperanza.....	72
4.13.	Resultados del análisis de las muestras de la Etapa II: Operación del sistema con agua de Julimes.....	74

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 GENERALIDADES

Una de las sustancias fundamentales para la existencia de la vida es el agua. No solamente se requiere a nivel biológico, si no que en la actualidad se ha convertido en parte fundamental de la base de la sociedad. Sin el agua, la mayoría de los procesos industriales, así como gran parte de las actividades cotidianas no podrían llevarse a cabo.

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km<sup>3</sup>, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 millones de km<sup>3</sup>, es agua dulce. De esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo (CONAGUA, 2011).

Las aguas subterráneas abastecen de agua potable por lo menos al 50% de la población, es decir que aproximadamente 2,500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias de agua (CONAGUA, 2011).

Las regiones que se abastecen de agua subterránea en ocasiones suelen tener problemas con la calidad de la misma, debido a los elementos presentes derivados de la geología de los acuíferos, tiempo de residencia del agua y tiempos de recarga, entre otros factores naturales y antropogénicos.

### **Características del agua**

El agua posee algunas características físicas como sabor, color, olor y turbidez. Los olores y sabores se deben principalmente a la presencia de sustancias químicas volátiles, así como a materia orgánica en descomposición. El color en el agua puede deberse a la presencia de elementos oxidables como el hierro (Fe) y el manganeso (Mn). La turbidez se relaciona con partículas suspendidas en el agua, las cuales pueden contener agentes patógenos adheridos a ellas.

El agua tiene la capacidad de disolver una gran cantidad de compuestos químicos, los cuales pueden ser de origen natural o producto de algún tipo de contaminación.

Algunas sustancias químicas presentes en el agua producen alcalinidad, dureza y/o salinidad (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Características del agua producidas por diferentes compuestos químicos (Tomada de [www.frro.utn.edu.ar](http://www.frro.utn.edu.ar))

<b>Grupo 1: Producen solo alcalinidad</b> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Carbonato de potasio - <math>K_2CO_3</math></li><li>○ Bicarbonato de Potasio - <math>KHCO_3</math></li><li>○ Bicarbonato de Sodio - <math>NaHCO_3</math></li><li>○ Carbonato de Sodio - <math>Na_2CO_3</math></li></ul>
<b>Grupo 2: Producen dureza carbonatada y alcalinidad</b> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Carbonato de Calcio - <math>CaCO_3</math></li><li>○ Carbonato de Magnesio - <math>MgCO_3</math></li><li>○ Bicarbonato de Calcio - <math>Ca(HCO_3)_2</math></li><li>○ Bicarbonato de Magnesio - <math>Mg(HCO_3)_2</math></li></ul>
<b>Grupo 3: Producen salinidad y dureza no carbonatada</b> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Sulfato de Calcio - <math>CaSO_4</math></li><li>○ Cloruro de Calcio - <math>CaCl_2</math></li><li>○ Nitrato de Calcio - <math>Ca(NO_3)_2</math></li><li>○ Sulfato de Magnesio - <math>MgSO_4</math></li><li>○ Cloruro de Magnesio - <math>MgCl_2</math></li><li>○ Nitrato de Magnesio - <math>Mg(NO_3)_2</math></li></ul>
<b>Grupo 4: Producen salinidad, pero no dureza</b> <ul style="list-style-type: none"><li>○ Sulfato de Potasio - <math>K_2SO_4</math></li><li>○ Cloruro de Potasio - <math>KCl</math></li><li>○ Nitrato de Potasio - <math>KNO_3</math></li><li>○ Sulfato de Sodio - <math>Na_2SO_4</math></li><li>○ Cloruro de Sodio - <math>NaCl</math></li><li>○ Nitrato de Sodio - <math>NaNO_3</math></li></ul>

Algunos constituyentes del agua, cuando se encuentran en altas concentraciones, pueden ser responsables de ocasionar daños en la salud de los consumidores. Entre dichos constituyentes se cuentan los fenoles, el arsénico, selenio, cianuros, cromo, plomo, mercurio, flúor, nitratos y compuestos orgánicos clorados, entre otros.

## 1.2 ARSÉNICO EN EL AGUA DE CONSUMO

El arsénico se presenta de forma natural en el medio ambiente tanto en aguas subterráneas como superficiales, al igual que en muchos alimentos.

La exposición crónica al arsénico a través del agua de consumo provoca varios efectos adversos a la salud. La norma oficial mexicana para agua potable establece como límite máximo permitido el valor de 0.025 mg/l (Modificación a la NOM-127-SSA1-1994).

### **Efectos del arsénico en la salud**

El arsénico en el agua superficial, así como en el agua subterránea, proviene principalmente de la deposición atmosférica, la disolución de minerales y la erosión de las rocas. Otra fuente posible de contaminación es el uso de plaguicidas en la agricultura (De Esparza, 2006).

La ingesta y la inhalación son las dos principales rutas de exposición de las personas al arsénico. Este elemento es acumulable en el organismo por exposición constante o crónica, y al alcanzar ciertas concentraciones puede provocar afecciones en la salud.

La absorción del arsénico que se encuentra en el agua y en los alimentos y que ingresa al organismo por vía bucal, depende de la liposolubilidad del compuesto (Bocanegra, 2002). Después de ser absorbido, el arsénico pasa al torrente sanguíneo y es distribuido a diferentes órganos; principalmente es depositado en la piel, los riñones, hígado, pulmones y corazón, así como en el cabello y las uñas; esto debido a que el As trivalente se combina con los grupos sulfidrilos de la queratina (Bocanegra, 2002). El depósito en el cabello, por ejemplo, comienza a las dos semanas de su administración y se mantiene durante años (Bocanegra, 2002).

Los síntomas y afecciones asociados a la exposición prolongada a altos niveles de arsénico varían entre las personas, los grupos poblacionales y las zonas geográficas, por lo que no existe una definición universal de las enfermedades causadas por este elemento (Who, 2001)

En muchas regiones una de las manifestaciones más comunes de la presencia del arsénico en el organismos es la dermatológica, es decir alteraciones en la piel que incluyen cambios de pigmentación, hiperqueratosis palmo-plantar (durezas y callosidades en las palmas de las manos y las palmas de los pies) y lesiones cutáneas. Se considera que estos efectos pueden ser precursores del cáncer de piel (Bocanegra, 2002).

Además del cáncer de piel, la exposición prolongada al arsénico también puede causar cáncer de pulmón y de vejiga. El arsénico y los compuestos de arsénico han sido clasificados como cancerígenos para los seres humanos por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (CIIC); el arsénico presente en el agua de bebida también ha sido incluido en esa categoría por el CIIC (WHO, 2001)

Se pueden asociar a la ingesta prolongada de arsénico otros efectos perjudiciales para la salud, tales como problemas relacionados con el desarrollo, neurotoxicidad, diabetes y enfermedades pulmonares y cardiovasculares (Carabantes, 2003). En particular, los infartos de miocardio inducidos por el arsénico pueden suponer una importante causa de aumento de la mortalidad (Carabantes, 2003). En China, la exposición al arsénico se ha vinculado a una afección grave de los vasos sanguíneos que causa gangrena conocida como “la enfermedad del pie negro” (sin embargo, esta enfermedad no se ha observado en otras partes del mundo). El arsénico también se asocia a desenlaces adversos del embarazo y mortalidad infantil, al igual que influencia negativa en el desarrollo cognitivo (Carabantes, 2003).

La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, estructura química y solubilidad en el medio biológico (Bocanegra, 2002).

### **El arsénico en México**

En México se han encontrado niveles altos de arsénico en el agua subterránea de varias regiones de Hidalgo (Armienta *et al.*, 2001), Guerrero (Cole, 2004), Jalisco (Hurtado-Jiménez, 2006), la Comarca Lagunera (Boochs, 2007), Baja California, San Luis Potosí, Michoacán y Puebla (Armienta y Segovia, 2008).

En el estado de Chihuahua, por ser una zona árida, el agua subterránea es el principal recurso para el abastecimiento público, así como para usos industriales y el riego agrícola. De los 61 acuíferos que existen en el estado, 30 presentan condiciones de sobreexplotación (DOF, 2018). Entre éstos se encuentra el acuífero Meoqui-Delicias (Figura 1.1).

Recientemente se han reportado elevadas concentraciones de arsénico en el acuífero Meoqui-Delicias, el cual se encuentra ubicado en la porción centro-sur del Estado de

Chihuahua, México. Este acuífero abastece a los municipios de Saucillo, La Cruz, San Francisco de Conchos, Rosales, Delicias, Meoqui y Julimes. En éste último se encuentran las localidades mayormente afectadas por los altos niveles de arsénico, que sobrepasan el límite establecido en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994.

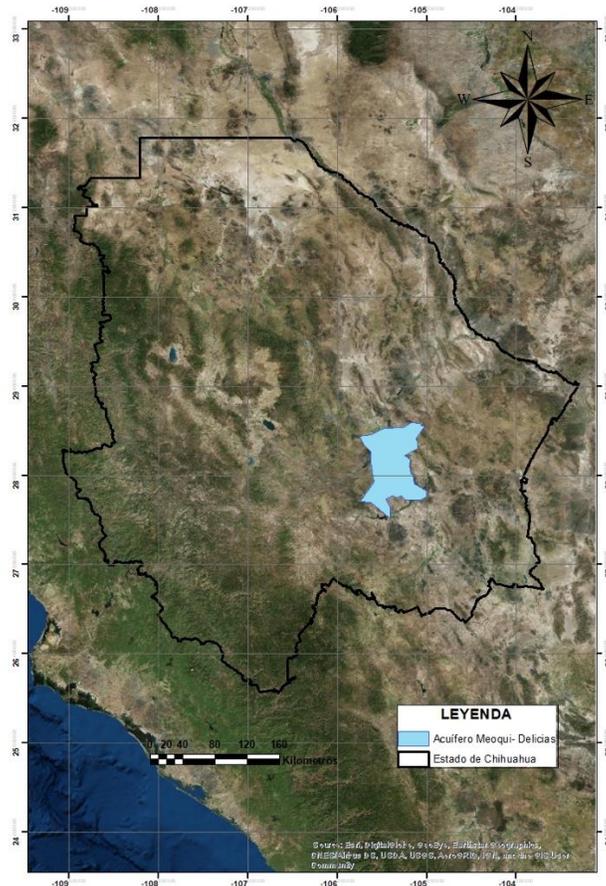


Figura 1.1. Acuífero Meoqui- Delicias en el estado de Chihuahua (Archivo shape de acuíferos en el estado de Chihuahua, CONAGUA)

Aunque en muchos de los sitios identificados con problema de calidad del agua ya se han instalado sistemas de ósmosis inversa para la desmineralización del agua que se destina al consumo directo y la elaboración de alimentos, existen pequeñas comunidades con difícil acceso a las plantas de tratamiento, por lo que requieren de un proceso de eliminación de arsénico y otros elementos indeseables en el agua de consumo que sea económico, eficiente, de fácil operación y adaptable a las condiciones del medio.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

En la investigación sobre calidad realizada en las fuentes de agua potable ubicadas en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias que abarca los municipios de Julimes, Rosales, Meoqui y Delicias en el Estado de Chihuahua, se identificaron varios sitios con alta concentración de arsénico y su relación con las características hidrogeoquímicas del área (Barrera, 2008). En dicho estudio se detectaron un gran número de poblaciones en las que el arsénico supera el valor límite de 0.025 mg/l establecido en la norma de agua potable, siendo más afectados los municipios de Julimes y Meoqui (Espino, 2009). En la Tabla 1.2 se muestran los resultados de calidad del agua de las principales localidades del municipio de Julimes, en donde, además de las altas concentraciones de arsénico, se observan valores elevados de salinidad en términos de sólidos disueltos totales (SDT) a causa de sodio, sulfatos, cloruros, así como también de fluoruros.

En los sitios señalados en la Tabla 1.3, las autoridades estatales instalaron sistemas de ósmosis inversa para la desmineralización del agua que se destina al consumo directo y la elaboración de alimentos. De esta manera se resolvió el problema de ingesta de agua con algo contenido de arsénico y otros constituyentes indeseables en el agua de consumo de la mayor parte de los habitantes del municipio.

Tabla 1.2. Resultados de calidad de agua en el municipio de Julimes\*

Comunidad	pH	SDT	Dur. Total	Ca	Mg	Na	K	SO4	HCO3	Cl	NO3	Flúor	Arsénico
San José	7.93	1093	110.2	40.9	2	439.1	1.76	440	147.05	256	17.1	7.15	0.139
La Regina	7.25	1650	409.5	139.1	14.9	536	6.47	800	313.72	515	11.25	3.7	0.277
Esperanza	7.13	797	222.5	76.3	7.7	365	2.72	490	196.07	112	8.55	3.93	0.125
Labor Nueva	7.17	986	427.4	148.6	13.5	316	8.65	740	181.37	94	22.5	2.87	0.072
La Boquilla	7	1182	432.7	149.9	14	234.6	8.88	920	228.31	96	18.45	2.32	0.068
El Carrizo	7.45	1449	294.5	103.5	8.6	273	5.04	580	156.86	56	21.6	3.4	0.092
Julimes	6.96	1441	392.5	134.8	13.4	238.7	11.58	770	213.23	94	17.55	4.13	0.126
ExH Humboldt	7.17	1055	353.4	116.5	15	251	8.32	480	242.64	44	9.9	3.28	0.077
El Gramal	7.29	1495	397.2	133.2	15.6	231	7.91	590	227.94	64	17.55	2.59	0.055
Arenillas	7.62	774	214	73.7	7.2	130.7	6.66	210	223.03	58	8.55	2.45	0.045

\*(Adaptado de Barrera, 2008)

Tabla 1.3. Localidades en el municipio de Julimes con planta de ósmosis inversa (JCAS, 2011).

<b>LOCALIDAD</b>	<b>POBLACION BENEFICIADA</b>	<b>ESTADO DE LA OPERACIÓN</b>	<b>Q. PROD. (LPD)</b>
EX - HACIENDA HUMBOLT	296	EN OPERACIÓN	2,000
LABOR NUEVA	176	EN OPERACIÓN	2,000
EL CARRIZO	115	EN OPERACIÓN	1,000
COL. LA ESPERANZA	404	EN OPERACIÓN	5,000
LA REGINA	559	EN OPERACIÓN	5,000
JULIMES 1 (TELESECUNDARIA)	1,756	EN OPERACIÓN	5,000
JULIMES 2 (PRIMARIA)		EN OPERACIÓN	5,000
SAN JOSE (EL ENTRONQUE)	507	EN OPERACIÓN	5,000
EL GRAMAL	133	EN OPERACIÓN	5,000
LA BOQUILLA	204	EN OPERACIÓN	5,000
LAS ARENILLAS	184	EN OPERACIÓN	5,000
Población total	4,334		

No obstante lo anterior, existen pequeñas comunidades cuya localización remota dentro del municipio les dificulta el acceso a las plantas de tratamiento y, por lo tanto, utilizan para consumo el agua de sus norias o pozos particulares. En estos pequeños poblados o rancherías se requiere contar con un proceso de eliminación de arsénico y otros elementos indeseables en el agua de consumo que sea económico, eficiente y de fácil operación.

La destilación solar se presenta como un método ideal para la desalinización de agua por su costo energético nulo y escasa inversión, especialmente en zonas áridas muy aisladas del resto de las poblaciones.

Por este motivo se ha considerado la posibilidad de utilizar la destilación solar como técnica útil para la eliminación de contaminantes del agua, aprovechando las altas tasas de radiación con que se cuenta en gran parte del estado de Chihuahua.

Diversos estudios han presentado a la destilación solar como un método ideal para la desalinización de agua por su costo energético nulo y escasa inversión, especialmente en zonas áridas muy aisladas del resto de las poblaciones.

Como antecedentes a esta investigación se menciona la llevada a cabo en 2016 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), en la que se estudió el comportamiento de un destilador de agua prototipo, con diseño geométrico de doble vertiente. Se probó la eficiencia del modelo que se alimentó con el efluente de un sistema secundario de tratamiento de aguas residuales ubicado al sur de la ciudad de Chihuahua. En dicho estudio se demostró la capacidad del destilador para remover más del 98% de los sólidos disueltos totales (SDT), el 98% de la conductividad eléctrica (CE) y más del 90% de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Dagda, 2017).

#### **1.4 OBJETIVO**

Probar la eficiencia de un sistema de destilación solar alimentado con agua subterránea con alto contenido de arsénico procedente de una localidad del municipio de Julimes, Chihuahua, para obtener un efluente en cumplimiento con la normatividad mexicana para agua potable.

#### **1.5 HIPÓTESIS**

La destilación solar mejora la calidad del agua subterránea con altas concentraciones de arsénico hasta el grado del cumplimiento con el límite establecido para dicho elemento en la normatividad mexicana para agua potable.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 AGUA SUBTERRÁNEA**

El ciclo hidrológico es un sistema abierto en el cual la radiación solar sirve como una fuente constante de energía. Esta es la mayor evidencia de evaporación y circulación atmosférica del agua. La energía que fluye en un río es producto del trabajo realizado por la energía solar, así como la evaporación del agua en la superficie del océano donde esta toca la tierra. Cuando el agua cambia de un estado a otro (líquido, vapor o sólido) es acompañado por un cambio térmico del agua. La energía calorífica es la cantidad de energía térmica contenida en una sustancia. Una caloría (cal) es definida como la energía necesaria para elevar la temperatura de un gramo (gr) de agua pura de 14.5°C a 15.5°C. Otras sustancias toman aproximadamente 1 cal para cambiar la temperatura de 1 gr en 1°C (Fetter, 2001).

La evaporación del agua requiere una entrada de energía llamada calor latente de vaporización. Cuando el vapor de agua es condensado a la forma líquida, una cantidad equivalente de calor llamado calor latente de condensación es desprendido. El agua también puede pasar directamente del estado sólido a vapor por un proceso llamado sublimación. El transporte del agua a través del ciclo hidrológico (Figura 2.1) y la transferencia de calor que acompañan son vitales para el balance de calor de la tierra (Fetter, 2001).

Los elementos principales del ciclo hidrológico se describen a continuación:

1. Evaporación: Proceso físico, mediante el cual, las moléculas de agua pasan del estado líquido hacia el estado gaseoso, esto en función del aumento de la temperatura ambiental.
2. Condensación: Consiste en el cambio de estado del vapor de agua que se encuentra contenido en las masas de aire a la fase líquida, esto como consecuencia del enfriamiento de dichas masas.
3. Precipitación: Se presenta cuando la humedad relativa del vapor de agua presente en las masas de agua es del 100%. Si la temperatura es lo suficientemente baja, la precipitación se da en forma de nieve.

4. Escorrentía: la escorrentía es definida como el tránsito de agua que circula por una cuenca de drenaje.
5. Transporte: es el movimiento de las masas de agua en estado líquido.

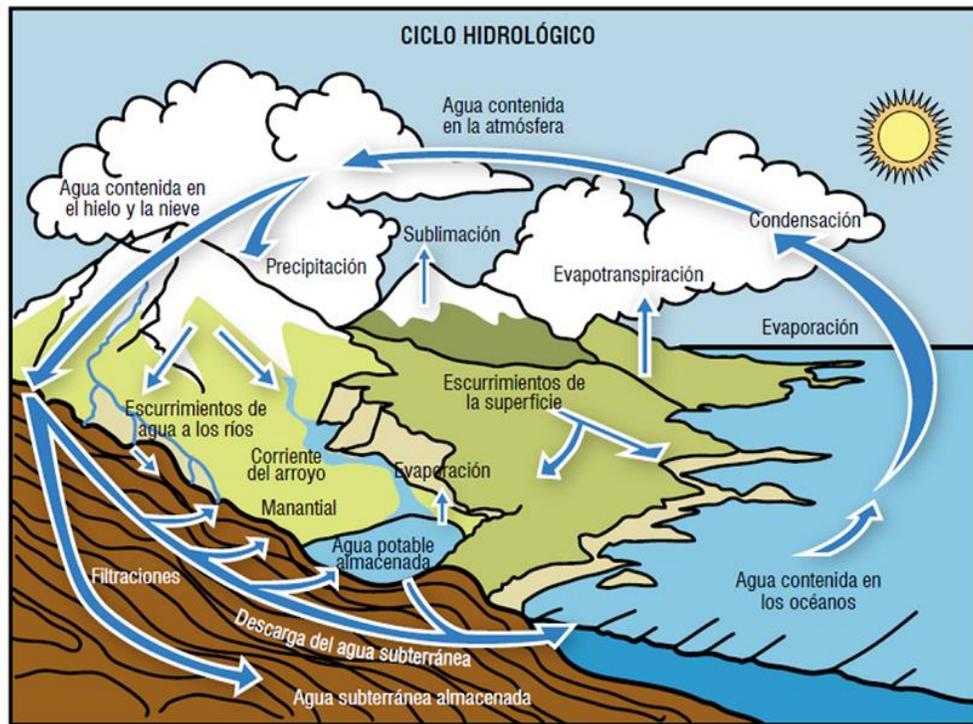


Figura 2.1. Etapas del ciclo hidrológico (Tomada de [www.meteorologiaenred.com](http://www.meteorologiaenred.com)).

Durante su formación, algunas rocas contienen espacios vacíos mientras que otras son sólidas. Los procesos de intemperismo físicos y químicos continúan descomponiendo y disgregando las rocas, generando así vacíos. Leves movimientos en las masas de roca cerca de la superficie pueden causar fracturamiento en éstas, causando así aberturas (Fetter, 2001).

Los sedimentos son granos minerales ensamblados donde son depositados mediante agua, viento, hielo o gravedad. Las aberturas en estos son llamadas espacios porosos entre los granos de sedimento (Fetter, 2001).

Un acuífero es una unidad geológica que puede almacenar y transmitir agua con tasas lo suficientemente rápidas para cubrir las necesidades de los usuarios. Materiales como arenas y gravas no consolidadas, areniscas, calizas y dolomías, flujos basálticos y rocas plutónicas y metamórficas fracturadas, son ejemplos de unidades geológicas conocidas por ser acuíferos (Fetter, 2001).

El agua subterránea se presenta en gran parte del planeta. El nivel freático, se encuentra a distinta profundidad, dependiendo de diversos factores, como lo son las condiciones meteorológicas, físicas, tasas de recarga y explotación de los acuíferos.

### **2.1.1 Constituyentes del agua subterránea**

A nivel mundial las aguas subterráneas constituyen la fuente principal de agua dulce y son fundamentales como fuente de agua potable para las comunidades.

La calidad del agua subterránea está relacionada con el tipo de ambiente hidrogeológico en el que se encuentre. Acuíferos ubicados a varios cientos de metros de la superficie tienen una recarga más lenta con respecto a otros situados cerca de la superficie, debido a la carga litostática, la cual provoca la reducción de la porosidad de las rocas y del fracturamiento. En este caso la interacción del agua y de la roca es mayor, resultando un incremento de la salinidad del agua subterránea.

La composición del agua subterránea básicamente se contempla desde los puntos de vista químico e isotópico. La composición química de ésta se define a través de la cuantificación de cada constituyente analizado. Aunque son más de 60 los constituyentes de estas aguas, por lo general sólo se determinan alrededor de 20 parámetros fundamentales.

Son diversos los factores que condicionan la composición del agua subterránea, ya que al poseer ésta una elevada propiedad solvente, es posible la incorporación de una gran variedad de constituyentes.

La incorporación de sustancias se da desde que comienza la introducción del flujo en el subsuelo, primero esta pasa por la zona no saturada, también conocida como zona de

aireación o zona vadosa. Aquí el agua se encuentra interactuando con gases atmosféricos y materia orgánica que también son introducidos al sistema y se desplazan mediante los poros presentes en el material geológico. Posteriormente el agua es desplazada hasta encontrar el nivel freático, el cuál es el límite entre la zona no saturada y la zona saturada. Al llegar a la zona saturada, el agua fue filtrada y sufrió modificaciones en su composición debido a los materiales y sustancias con los cuales interactuó. Sin embargo la modificación no termina ahí y siempre continua, puesto que las interacciones físicas, químicas y biológicas con el medio hidrogeológico en el que se encuentra permanecen, hasta que esta es extraída nuevamente a la superficie.

Aunque existe una gran variedad de elementos en el agua subterránea, estos han sido clasificados por la frecuencia en la que se presentan (Freeze y Cherry, 1979).

#### **a) Constituyentes fundamentales**

*Aniones:*

Bicarbonatos y carbonatos ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ )

*Cationes:*

Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ )

*Otros:*

$\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{SiO}_4\text{H}_4$ ,  $\text{SiO}_2$

#### **b) Constituyentes secundarios**

*Aniones:*  $\text{F}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SH}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{BO}_3^{3-}$

*Cationes:* Mn, Fe, Li, Sr, Zn

#### **c) Constituyentes traza**

Al, Ti, Co, Cu, Pb, Ni, Cr, etc.

De los elementos presentes en el agua subterránea, el arsénico se considera un constituyente traza. Sin embargo, este elemento es de gran importancia por las afectaciones que causa a la salud.

### 2.1.2 Usos del agua subterránea

El 97.5 % del agua del planeta se encuentra en los océanos; únicamente el restante 2.5% es agua dulce. Del total de agua dulce, el 69% se encuentra congelada en los polos; el 1% escurre por las cuencas hidrográficas en forma de ríos y arroyos y se deposita en lagos y lagunas, mientras que el 30% remanente se encuentra en el subsuelo (Figura 2.2).

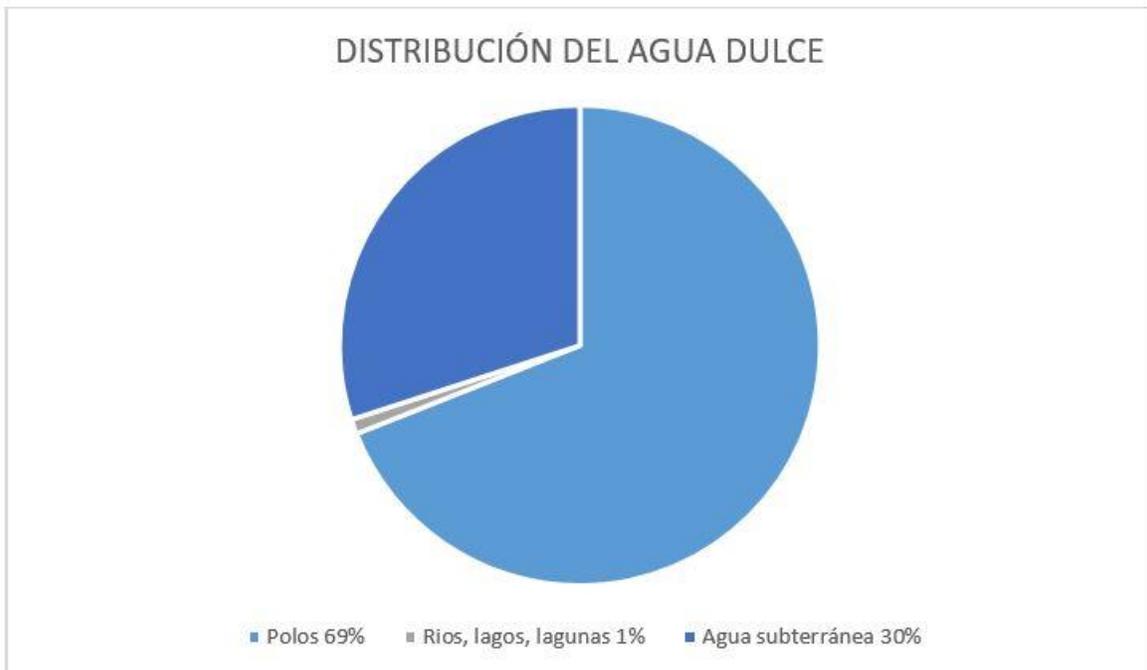


Figura 2.2. Distribución del agua dulce en el mundo (jumapam.gob.mx).

Las aguas subterráneas representan el 98% del agua dulce que no se encuentra atrapada en los polos, por lo que se son fundamentales hoy en día, para el desarrollo socio- económico en muchas regiones del mundo, así como para el abastecimiento de las poblaciones (Agudelo, 2009).

## **Uso industrial**

En la actualidad, el agua subterránea representa una importante fuente de abastecimiento para las industrias. Constituye una fuente continua en tiempos de escasez de agua superficial. Es importante mencionar que hoy en día, la mayoría de los procesos industriales se llevan a cabo mediante la utilización de este recurso, ya sea como materia prima, o como un constituyente del proceso.

## **Uso agrícola**

En países considerados como áridos o semiáridos, éste es el principal uso que se da al agua subterránea.

La extracción de agua subterránea para el uso agrícola tiene gran impacto, sobre todo en regiones donde el agua superficial escasea, causando un serio agotamiento del recurso. Por otra parte, las prácticas agrícolas ejercen un amplio impacto en la recarga y calidad del agua subterránea, ya sea mediante la lixiviación de los nutrientes del terreno, contaminación con pesticidas la movilización de salinidad presente en el perfil del suelo (GWP, 2012).

En México, el 76.3% del volumen de agua subterránea es concesionado es para uso agrícola. La superficie sembrada bajo riego subterráneo al año 2016 fue de 6.05 millones de hectáreas (CONAGUA, 2018).

## **Uso doméstico**

El uso del agua subterránea para el abastecimiento de la población se ha venido incrementando sobre todo en zonas áridas. A este respecto es fundamental contemplar tanto la cantidad como la calidad del agua que se extrae.

En México en regiones donde la escasez de agua superficial es importante, la utilización de agua subterránea para abastecimiento de la población, llega a ser del 19% al 70% (CONAGUA, 2011).

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA POTÁBLE**

El agua destinada al consumo humano procede de fuentes superficiales como ríos, lagos y presas, o del subsuelo, en forma de agua subterránea. En muchas ocasiones su origen es una combinación de ambos tipos.

El agua potable, es decir, apta para consumo humano, requiere cierta calidad, la cual se evalúa mediante los estándares físicos, químicos y biológicos fijados en normas nacionales e internacionales.

El agua utilizada para bebida puede ser un importante transmisor de microorganismos causantes de diversas enfermedades. Grandes epidemias acontecidas a la humanidad prosperaron gracias a la contaminación del agua de consumo. En la actualidad, en la mayoría de los países, sobre todo en los países desarrollados, estos problemas debidos al agua contaminada han sido prácticamente erradicados.

Una de las medidas tomadas, y que tuvieron un gran resultado durante el siglo pasado, fue la desinfección del agua mediante la aplicación de cloro (Castro de Esparza, 2006). Este compuesto impide el desarrollo de microorganismos en el agua de consumo; también es efectivo en el proceso de eliminación de hierro, manganeso, sulfuros, entre otras sustancias, por lo que hoy en día es el material más usado en la desinfección del agua.

La aplicación de componentes químicos en el agua de consumo, incluso en el caso de cloro, puede resultar peligrosa para la salud; es por eso que la utilización de estos compuestos debe ser estrictamente vigilada.

### **2.2.1 Estándares del agua potable**

La Organización Mundial de la Salud (OMS o WHO por sus siglas en inglés) establece las directrices para la calidad de agua potable. Éstas son el punto de referencia internacional para el establecimiento de los estándares de seguridad del agua potable.

Por otra parte, la Agencia para la Protección Ambiental de EE.UU. (EPA, por sus siglas en inglés) ha definido dos categorías para el agua potable:

- *Estándares primarios:* Se han establecido para aquellos contaminantes que al consumirse causan daño en la salud humana. Estos contaminantes, a su vez, se dividen en tres categorías: patógenos, que son organismos como bacterias y hongos, incluidos también los virus; elementos radioactivos, que son sustancias que emiten radiación, como el uranio y el radio; y químicos tóxicos, que son sustancias que causan gran daño a la salud e incluso la muerte. Estos estándares establecen un límite de la cantidad de cada contaminante que puede estar presente en el agua potable provista por un sistema público de agua. Este límite se llama nivel máximo del contaminante (NMC), y se mide usualmente en miligramos por litro (mg/l).
- *Estándares secundarios:* Los estándares secundarios regulan los contaminantes que no dañan a la salud, pero que pueden representar una molestia para los consumidores. Entre estos se regulan los contaminantes que causan mal sabor, olor, color, corrosión, espuma o manchas. El estándar se llama nivel máximo del contaminante secundario (NMCS).

La EPA se basa en tres criterios al desarrollar los estándares primarios: si daña la salud, si es detectable en el agua potable y si se sabe que ocurre en el agua potable.

### **2.2.2 Normatividad para agua potable en México**

En México las normas concernientes a la regularización del agua potable son de carácter obligatorio. Dentro de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) se encuentran los requisitos, información, procedimientos, especificaciones y metodologías, que permiten establecer los parámetros evaluables.

En el país se manejan una serie de normas para el buen manejo del agua de consumo, las cuales son:

- NOM-179-SSA1-1998. Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público.
- NOM-230-SSA1-2002. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento

públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.

- NOM-012-SSA1-1993. Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados.
- NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.
- Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

La Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 es la norma más importante en materia de agua potable, puesto que es la que se encarga de regular los límites permisibles de calidad química, física y bacteriológica. Esta norma también permite determinar el tratamiento que necesita el agua a partir de su calidad.

### **2.3 ORIGEN DEL ARSÉNICO EN EL AGUA**

El arsénico es un elemento químico natural cuyo símbolo es As. En la naturaleza se presentan dos tipos de As: orgánico (arsenobetaina, arsenocolina, sales del ácido trimetilarsónico, arsenoazúcares y lípidos que contienen arsénico), e inorgánico (arsina cuya fórmula química es  $\text{AsH}_3$ ) (WHO, 2001).

Este elemento está considerado entre los veinte más abundantes sobre la tierra. Está presente en cantidades trazas en rocas, suelo, agua y aire. Este elemento puede existir en cuatro estados de valencia como  $\text{As}^{3-}$ ,  $\text{As}^0$ ,  $\text{As}^{3+}$  y  $\text{As}^{5+}$ . El arsénico se encuentra en el ambiente principalmente como arsenito y arseniato (WHO, 2001).

El arsénico en su forma inorgánica, es el más tóxico de los dos. La exposición a altos niveles de esta forma de As, se debe a la presencia de este en diversas formas minerales como la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), el rejalgar ( $\text{As}_2\text{S}_2$ ), el oropimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) y el trióxido de arsénico ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ), esto dependiendo de los sedimentos o rocas en los que se encuentra,

ya que una vez que la fuente de este elemento entra en contacto con agua, el As es movilizado a través de ésta, mediante reacciones hidrogeoquímicas (WHO, 2001).

La presencia del arsénico en el agua no solo se da como resultado de procesos naturales, sino que también es provocada por actividades antropogénicas. Se ocasiona a través de la aplicación de insecticidas en las zonas agrícolas, así como mediante la producción industrial de plomo, cobre y zinc (WHO, 2001).

El arsénico no tiene olor ni sabor característicos, por lo que su presencia en el agua, comida y aire pasa totalmente desapercibida.

Al menos cuatro millones de personas en países de América Latina como Argentina, Chile, Nicaragua, El Salvador, Perú y México, beben agua con niveles de arsénico que constituyen un riesgo para su salud. Las concentraciones de arsénico principalmente en el agua subterránea, presentan casos en los cuales los niveles son de hasta 1 mg/l (Castro de Esparza, 2006).

## **2.4 MÉTODOS PARA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA**

El tratamiento de agua de origen superficial para la obtención de agua potable, en general, se orienta a la remoción de color, turbiedad y microorganismos. Este proceso es logrado mediante una adecuada combinación de procesos tales como coagulación (desestabilización de las partículas coloidales), floculación, sedimentación, filtración y desinfección

La remoción de sustancias disueltas del agua, tales como el arsénico, requiere de métodos más complejos. Existen alrededor de 14 tecnologías para remover arsénico del agua, las cuales tienen eficiencias que varían del 70% al 99%.

En grandes sistemas, los métodos de ablandamiento con cal y coagulación-floculación son los más usados para la potabilización del agua, pero no son muy eficientes para remover el arsénico.

En pequeños sistemas puede aplicarse la ósmosis inversa, intercambio iónico, alúmina activada, nanofiltración y electrodiálisis inversa. Las tecnologías emergentes son: arena

recubierta con óxidos de hierro, hidróxido férrico granular, empaques de hierro, hierro modificado con azufre, filtración con zeolita, adición de hierro con filtración directa y remoción convencional de hierro y manganeso (Castro de Esparza, 2004).

### **Oxidación – Reducción**

En este proceso el arsenito es oxidado a arsenato, para así lograr una mejor remoción en procesos complementarios. Para esto, se puede usar cloro, dióxido de cloro, permanganato de potasio u ozono (Castro de Esparza, 2004).

La oxidación catalítica del  $As^{+3}$  es posible en presencia de carbón activado, radiación ultravioleta y óxido de cobre. Uno de los inconvenientes de este proceso es el tiempo de reacción. También es posible su oxidación biológica y por medio de la acción catalítica de la luz (Castro de Esparza, 2004).

### **Ablandamiento con cal**

Mediante el ablandamiento con cal, este se hidroliza para formar carbonato de calcio (mediante su reacción con ácido carbónico), el cual actúa como el agente adsorbente en la remoción de arsénico. Este proceso es típicamente usado solo con aguas muy duras y con tratamiento a pH en el rango de 10 a 12 (Johnston, 2001).

El principal constituyente en la remoción del arsénico mediante el ablandamiento de aguas que contienen magnesio, es la adsorción del arsénico dentro del hidróxido de magnesio que se forma durante el ablandamiento. También la remoción del arsenato es excelente a  $pH > 11$ , y más pobre a  $pH < 10$ . La remoción de arsénico se mejora con la adición de hierro. Pero el carbonato disminuye el efecto (Castro de Esparza, 2004).

### **Coagulación-adsorción-precipitación**

El arsénico en aguas subterráneas es móvil en condiciones reductoras, pero es posible su inmovilización creando condiciones oxidantes en la superficie del acuífero.

Las condiciones óptimas para la remoción del arsénico dependerán de las características del agua y del proceso de tratamiento. Debido a la dificultad de remover  $As^{+3}$  por coagulación, se requiere de su oxidación a  $As^{+5}$ . En rangos de pH alto y bajo, la eficiencia de este método disminuye significativamente (Johnston, 2001).

En las plantas de tratamiento de agua, el  $\text{As}^{+5}$  se puede remover efectivamente, tanto por coagulación con sulfato de aluminio o hierro, como por los procesos de ablandamiento con cal (hidróxido cálcico) y carbonato de sodio. Los coagulantes señalados se hidrolizan formando hidróxidos, sobre los cuales el  $\text{As}^{+5}$  se adsorbe y precipita con otros iones metálicos (Castro de Esparza, 2004). Estos procesos son dependientes de la concentración inicial de este elemento, el pH del agua tratada, y el tipo y la dosis del coagulante. El mecanismo de remoción del arsénico es a través del sólido formado con una gran superficie de adsorción o por coprecipitación (Castro de Esparza, 2004).

### **Intercambio iónico**

En la remoción de arsénico, las resinas de intercambio aniónico requeridas son de base débil y fuerte. Las de base fuerte pueden remover el arsenato del agua produciendo un efluente con menos de 0,001 mg/l de arsénico. Este método no remueve el arsenito y permite la diferenciación analítica entre las especies de arsénico. Los principales interferentes del proceso son el sulfato y los sólidos disueltos totales; el hierro y manganeso pueden provocar la obstrucción del lecho. Cuando se presentan estos parámetros en concentraciones altas, el agua requiere un pretratamiento. La remoción del arsénico es relativamente independiente del pH. Las ventajas de las resinas de intercambio iónico son su fácil regeneración con cloruro de sodio, su amplio rango de pH y el mejoramiento de la calidad del agua por la remoción de cromato, selenato, nitrato y nitrito (Castro de Esparza, 2004).

### **Ósmosis inversa y nanofiltración**

La ósmosis inversa consiste en un proceso para separar un componente de otro en una solución, mediante las fuerzas ejercidas sobre una membrana semipermeable.

Durante este proceso el solvente pasa de una solución menos concentrada a otra más concentrada, a través de una membrana semipermeable. Entre ambas soluciones existe una diferencia de energía, originada en la diferencia de concentraciones. El solvente pasará en el sentido indicado hasta alcanzar el equilibrio (Figura 2.3). Si a la solución más concentrada se agrega energía en forma de presión, el flujo de solvente se detendrá

cuando la presión aplicada sea igual a la presión Osmótica Aparente entre las dos soluciones. Esta presión Osmótica Aparente es una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones. Si se aplica una presión mayor a la solución más concentrada, el solvente comenzará a fluir en el sentido inverso.

El flujo de solvente es una función de la presión aplicada, de la presión osmótica aparente y del área de la membrana presurizada.

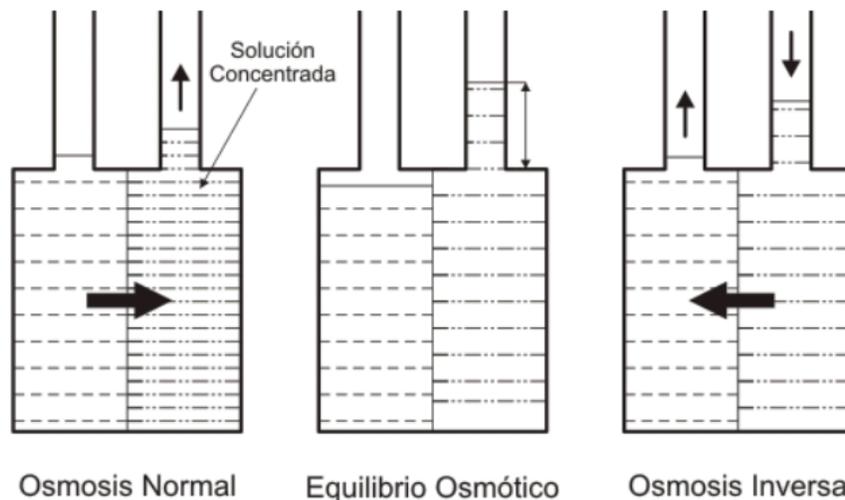


Figura 2.3. Principio de la ósmosis inversa (Tomada de [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com))

Los componentes básicos de una instalación típica de ósmosis inversa consisten en un tubo de presión conteniendo la membrana, una bomba la cual suministra en forma continua el fluido a tratar a los tubos de presión, y además es la encargada en la práctica de suministrar la presión necesaria para producir el proceso. Una válvula reguladora en la corriente de concentrado es la encargada de controlar la misma dentro de los elementos (Figura 2.4).

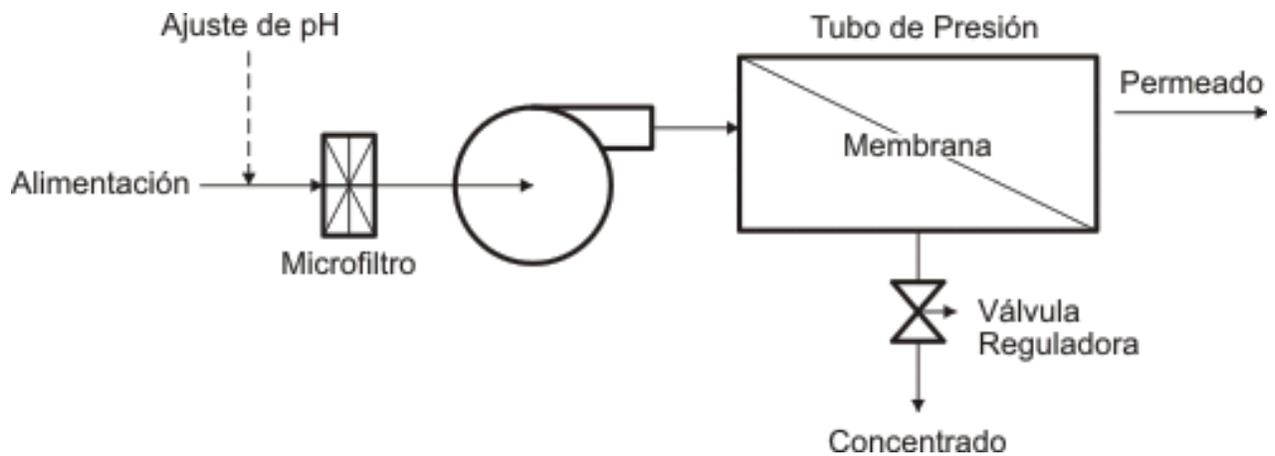


Figura 2.4. Esquema de un sistema de ósmosis inversa (tomada de [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com))

El proceso genera eficiencias de remoción del orden de 95% cuando la presión de operación está a 1 psi ideal. La remoción del arsénico es independiente del pH y de la presencia de otros solutos. La membrana requiere que el agua a tratar no contenga cantidades excesivas de material coloidal. En la nanofiltración, la eficiencia de remoción del arsénico alcanza a 90% (Johnston, 2001).

La remoción de contaminantes incluido el arsénico, logra usando sistemas de ósmosis inversa de alta y baja presión (400 psi y 200 psi respectivamente). Estos sistemas remueven  $As^{+5}$  entre 91-98% en reactores de alta presión y entre 77-87% en reactores de baja presión. La efectividad de las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para remover  $As^{+3}$  y  $As^{+5}$  en un rango de operación de 40-400 psi, en muestras de aguas sintéticas y naturales es entre 96-99% (Johnston, 2001). Esta separación se atribuye al alto peso molecular del arsenato y arsenito. Estas membranas son ideales para aguas subterráneas donde predomina el  $As^{+3}$  ya que no requerirían de una oxidación previa. Las variaciones en el pH (4-8) no afectan la remoción de las formas de arsénico.

Las principales desventajas son: La necesidad de operar a presiones bastante altas, costos de operación altos, el agua tratada tiene muy bajos niveles de sólidos disueltos, lo que le confiere características corrosivas y bajos niveles de micronutrientes importantes para la salud humana (Johnston, 2001).

### **Electrodiálisis inversa**

Se trata de un método diseñado para desmineralizar agua sin la adición de productos químicos continuamente. Este sistema requiere una inversión periódica de la polaridad de los electrodos de la pila, logrando así el control de los precipitados. Para operar, este sistema emplea agua presurizada entre 4 a 6 kg/cm<sup>2</sup> (Castro de Esparza, 2004).

Su eficiencia de remoción es de hasta 80%. El porcentaje de recuperación del agua tratada es de 20 a 25% con respecto al afluente. Esto es un problema para regiones que tienen escasez de agua. Esta técnica no es competitiva con respecto a los métodos de ósmosis inversa y nanofiltración, en cuanto a costos y eficiencia del proceso (Castro de Esparza, 2004).

### **Procesos biológicos**

Estos procesos se están proponiendo como métodos alternativos para la remoción de arsénico, pero se conoce poco sobre la viabilidad del uso de la actividad bacteriana para eliminar el arsénico en agua (Johnston, 2001).

Estudios a escala piloto muestran que condiciones óptimas de pH, temperatura y oxígeno permiten la filtración biológica y eliminación simultánea de As<sup>+3</sup> y hierro. El parámetro crítico es la concentración inicial de hierro. A mayor concentración de hierro, la eficiencia de la remoción del arsénico llega a ser >90%, y a menor concentración, la eficiencia es de aproximadamente 40%. Para sistemas de agua con bajas concentraciones de hierro, es recomendable adicionar sulfato ferroso para completar la remoción del arsénico. La fijación del As<sup>+3</sup> en los óxidos de hierro producidos por la actividad bacteriana es el mecanismo principal. La filtración biológica para el tratamiento de arsénico puede aplicarse a cualquier sistema de agua subterránea para la oxidación bacteriológica del hierro (Castro de Esparza, 2004).

### **Método de destilación**

La destilación es un proceso por el cual, mediante la aplicación de calor se puede separar las distintas sustancias de una mezcla líquida. Este método elimina las sales, residuos de hongos, bacterias, virus y contaminantes.

## 2.5 DESTILACIÓN SOLAR

### Radiación solar

El sol es una estrella constituida por hidrógeno (81%), helio (18%) y otros elementos (1%). En su núcleo se producen reacciones termonucleares que transforman hidrogeno en helio y desprenden una gran cantidad de energía.

La radiación solar es el conjunto de radiaciones emitidas por el sol que están distribuidas desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. El planeta Tierra no es alcanzado por toda la radiación, pues algunas ondas ultravioletas son absorbidas por los gases de la atmosfera (Duffie, J. y Beckman, 1974).

La irradiancia solar es la magnitud empleada para indicar el valor de la radiación incidente en una superficie. En el caso del Sol, se define como la energía solar recibida por cada  $m^2$  en un segundo. En el planeta, la máxima potencia que podemos recibir sobre la superficie de la Tierra, dependiendo del lugar y la época de año, es de  $1000 \text{ W/m}^2$  (Duffie, J. y Beckman, 1974).

La radiación solar, es transferencia de energía por ondas electromagnéticas. Todas estas ondas se desplazan por el vacío a una velocidad de  $299.792 \text{ Km/s}$ .

El conjunto de la radiación emitida constituye el espectro electromagnético (Figura 2.5), la proporción de la radiación solar en las distintas regiones de espectro sería aproximadamente: ultravioleta (7%), luz visible (43%), infrarrojo (49%) y el resto (1%).

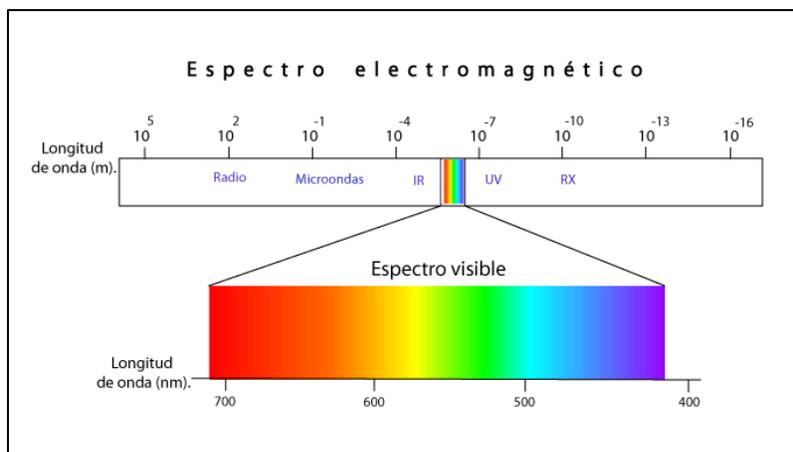


Figura 2.5. Espectro electromagnético solar (Tomada de [www.aemet.es](http://www.aemet.es))

Hay cuatro tipos de radiación, y cada uno se distingue en función de la radiación solar que reciben los distintos objetos ubicados en la superficie terrestre:

- *Radiación directa:* esta radiación es la que llega directamente del sol, sin haber sufrido cambios en su dirección.
- *Radiación difusa:* esta radiación va en todas direcciones como consecuencia de las reflexiones y absorciones de los cuerpos situados en la tierra.
- *Radiación reflejada:* es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de esta radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo.
- *Radiación global:* Es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones.

La energía emitida por el sol, cuando atraviesa la atmósfera de la Tierra, calienta el vapor de agua en unas zonas de la atmósfera más que otras, causando la circulación atmosférica por la alteración en la densidad de los gases. Esta energía produce la temperatura en la superficie terrestre.

### **Inicios de la destilación solar**

La destilación solar funciona mediante un sistema eficiente y sencillo, que permite reproducir de manera acelerada y controlada los procesos naturales de evaporación y condensación del agua. Los principios de la destilación solar pueden ser aplicados a distintas escalas, desde pequeños destiladores, hasta grandes instalaciones.

La primera planta de destilación solar fue confeccionada en 1872 por el ingeniero sueco Charles Wilson. Esta planta fue construida en Las Salinas, ubicado a 112 km de Antofagasta, en Chile. La planta se elaboró para desalinizar agua de mar y así proporcionar agua potable a trabajadores del sector minero que se encontraba en dicho lugar.

El destilador consistía en cajas o charolas poco profundas, la cuales se llenaban de agua salada, y estaban cubiertas por un techo oblicuo de vidrio, de una extensión de 4000 m<sup>2</sup>

(Figura 2.6). El agua se elevaba desde los pozos mediante una bomba de molino de viento hasta un estanque con capacidad para cuatro días.

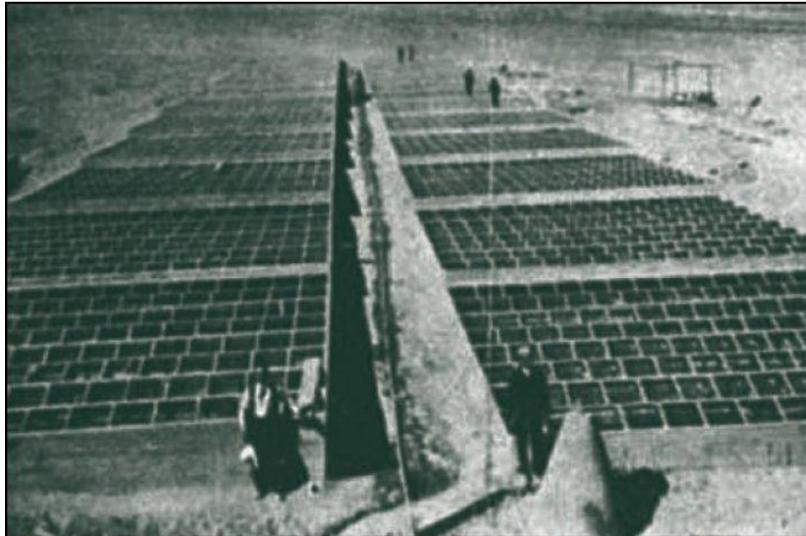


Figura 2.6. Primera planta de destilación solar (Tomada de [historiadelaagua.wordpress.com](http://historiadelaagua.wordpress.com))

El sol calentaba el agua de las charolas por los rayos que pasaban a través de los vidrios. De esta manera, se producía vapor que se condensaba y era conducido a través de tuberías hasta un depósito donde era almacenada el agua destilada. Este destilador llegó a producir en verano más de 20.000 litros de agua potable. El destilador fue operado hasta el año 1970.

En la actualidad existen instalaciones de este tipo que se han desarrollado en diversas zonas del mundo con escasez de agua, pero con acceso al mar como Israel, Islas Canarias (España) y en diversas islas áridas del mediterráneo, entre otras.

En México se desarrolló entre 1970 y 1980 un proyecto para desalinizar agua de mar en la ciudad de La Paz, en el estado de Baja California Sur. El tipo de planta construido fue de evaporación instantánea por etapas, recaudando aproximadamente 10,000 litros/día (Bermúdez y Thomson, 2008).

## Tipos de destiladores solares

Un destilador solar consiste en un contenedor, el cual cuenta con un fondo de color negro, y es donde se deposita el agua a destilar. En la parte superior se coloca una superficie transparente que permita el paso de la radiación solar y a su vez, mantenga cerrada la estructura. Al contar con un espacio confinado, se logra el calentamiento del agua, al tiempo que se retiene la humedad en el interior.

El vapor de agua generado asciende por la estructura gracias a la convección, hasta entrar en contacto con la superficie transparente, la cual se encuentra a una temperatura menor que el fondo negro del destilador. El agua se condensa formando gotas, las cuales fluyen hacia un recipiente donde son colectadas; esto gracias a la disposición de la superficie en la que se generan (Figura 2.7).

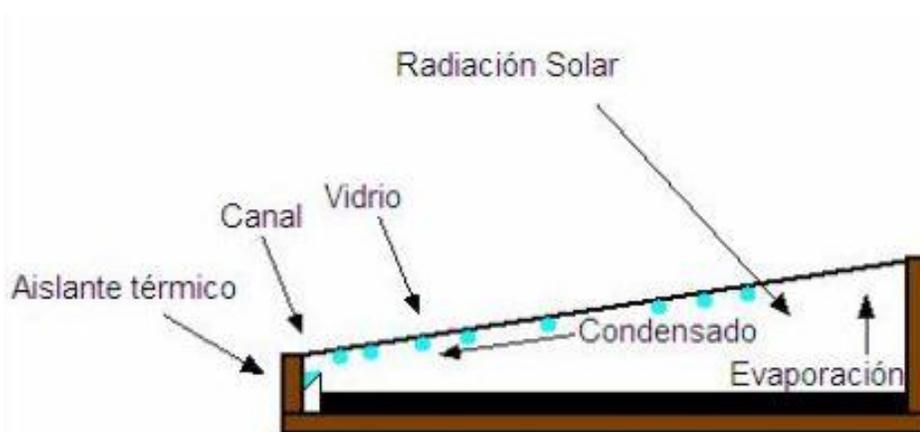


Figura 2.7 Principio de la destilación solar (Tomada de [www.unet.edu.ve](http://www.unet.edu.ve))

Los destiladores solares tienen varias presentaciones, y su diseño es a criterio de su usuario o fabricante, a continuación, se enumeran algunos ejemplos:

1. Destilador solar de una vertiente: Consta de una estructura rectangular dividida en dos partes, cubierta por un cristal inclinado. La zona que se encuentra cubierta por el cristal a mayor altura se pinta de color negro y es donde se coloca el agua a destilar, mientras que, en el lado opuesto, cubierto con el cristal a menor altura, es donde se colecta el agua destilada (Figura 2.8).

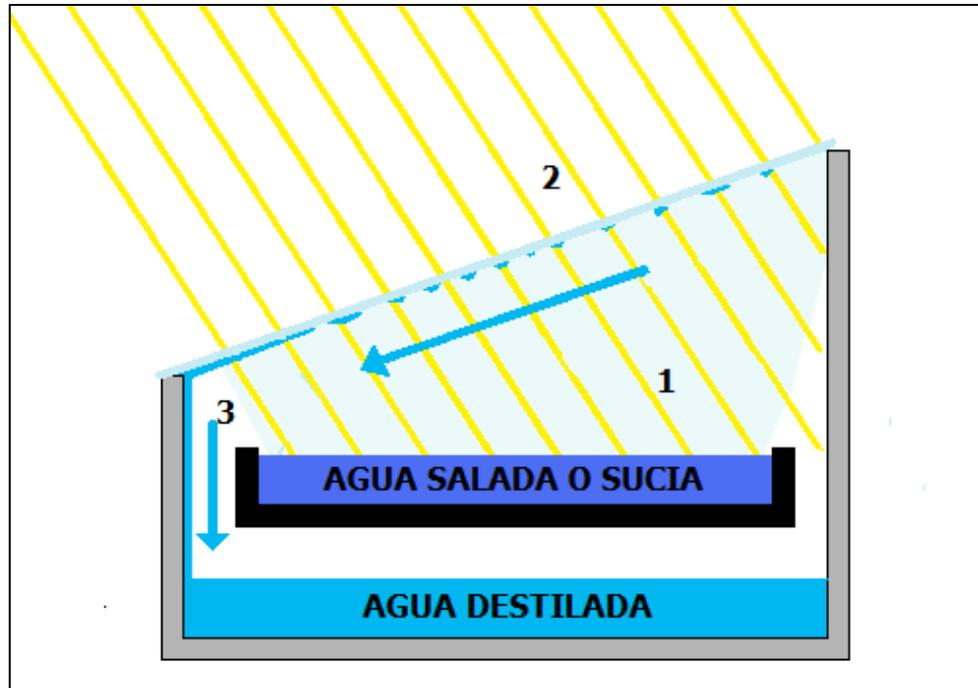


Figura 2.8 Destilador solar sencillo de una vertiente. 1) Evaporador, 2) Radiación solar, 3) Destilado (Tomada de [www.unet.edu.ve](http://www.unet.edu.ve))

2. Destilador solar de doble caseta (dos vertientes): Consta de una estructura ya sea rectangular o cuadrada, la cual se encuentra cubierta por un panel transparente dispuesto a dos aguas. Las gotas de agua condensada se deslizan por este panel hacia las orillas donde son colectadas en un recipiente colocado debajo de la bandeja con fondo negro donde se coloca el agua a destilar.

3. Destilador solar de invernadero: Es el mismo modelo del destilador de dos vertientes solo que, a gran escala, como su nombre lo dice es una estructura de invernadero.

4. Destilador solar de cascada: Consta de una estructura en forma de terrazas o escalera.

En la parte superior de cada terraza o escalón se ubican depósitos de color negro y es donde se coloca el agua a destilar. Las gotas de agua condensada se deslizan por el

panel transparente colocado de forma inclinada sobre la estructura y son recolectadas en un recipiente.

5. Destilador solar multietapa: Este modelo alcanza altas temperaturas, ya que emplea sistemas de colectores solares complejos, como tubos de vacío, concentradores parabólicos, etc. El vapor de agua se condensa con ayuda de un refrigerante y el calor se recupera y se almacena en depósitos. Este modelo requiere una mayor inversión que los mencionados con anterioridad, sin embargo, es más eficiente.

### **Elementos de un destilador solar**

Cada elemento del destilador solar es de gran importancia para obtener un correcto funcionamiento del mismo. A continuación, se describen los componentes del sistema:

- Colector solar:

El colector solar consiste en una charola, extensa, pero de poca profundidad, su cara superior debe ser de color negro. En este colector se coloca el agua que se desea destilar. Es importante señalar que el agua debe estar en contacto directo con el fondo negro de la charola.

El material de la charola es de vital importancia, ya que debe ser anticorrosivo e inoxidable (Dagda, 2016).

- Evaporador:

El evaporador se considera la zona donde se lleva a cabo el proceso de evaporación; la charola funge como evaporador en la mayoría de los casos, es por este motivo que la profundidad de la charola debe ser poca, entre más pequeña el agua puede alcanzar temperaturas comparativamente altas (Dagda, 2016).

- Cámara de aire:

La cámara de aire se encuentra inmediatamente encima del evaporador. Su función es transferir agua al aire para saturarlo. El aire transporta las moléculas de agua del evaporador al condensador (Dagda, 2016 y referencias).

- Condensador:

La condensación en un destilador solar es de vital importancia, y se lleva a cabo con la asociación de varios procesos.

El aire entre en evaporador y el condensador, se encuentra saturado de agua. Por lo que este, al entrar en contacto con una superficie que tenga menor temperatura, permite la extracción del agua en su fase líquida (Dagda, 2016 y referencias).

- Recolectores

El destilado que se encuentra a lo largo del condensador escurre hacia abajo, por lo que debe ser recolectado de una forma en la que no se contamine. Para ello se utilizan canales casi horizontales, colocados en la parte baja del condensador. Estos canales conducen el destilado hacia el punto en el será almacenado.

Los materiales con los que se construyan estos canales son de vital importancia. La mayoría de los metales, los plásticos y los materiales cerámicos, transfieren al agua destilada un sabor característico.

Los únicos materiales que no alteran el sabor del destilado son: el vidrio, el acero inoxidable y algunos plásticos (Dagda, 2016 y referencias).

## **CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA**

En este capítulo se presentan las características del sistema de destilación solar utilizado para la desalinización de agua subterránea con alto contenido de arsénico, así como los materiales utilizados para su acondicionamiento.

Se presenta también el procedimiento experimental, con sus distintas etapas y la operación del sistema.

### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El acuífero Meoqui-Delicias se encuentra en la porción centro-sur del estado de Chihuahua. Presenta una superficie aproximada de 4,830 km<sup>2</sup>. Este acuífero está delimitado geográficamente por los paralelos 27° 31' y 28° 35' de latitud norte y los meridianos 105° 45' y 105° 00' al oeste de Greenwich.

El acuífero Meoqui-Delicias es de manera general de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento; esto, debido a la existencia de lentes arcillosos o de rocas volcánicas compactas. Está constituido por sedimentos clásticos de granulometría variada, que alcanzan un espesor de hasta 600 m en las porciones centro y norte (CONAGUA, 2015)

En el estado de Chihuahua, el acuífero Meoqui- Delicias abarca de manera parcial a los municipios de Rosales, Julimes, Saucillo, La Cruz, San Francisco de Conchos, así como casi en su totalidad los municipios de Delicias y Meoqui (Figura 3.1).

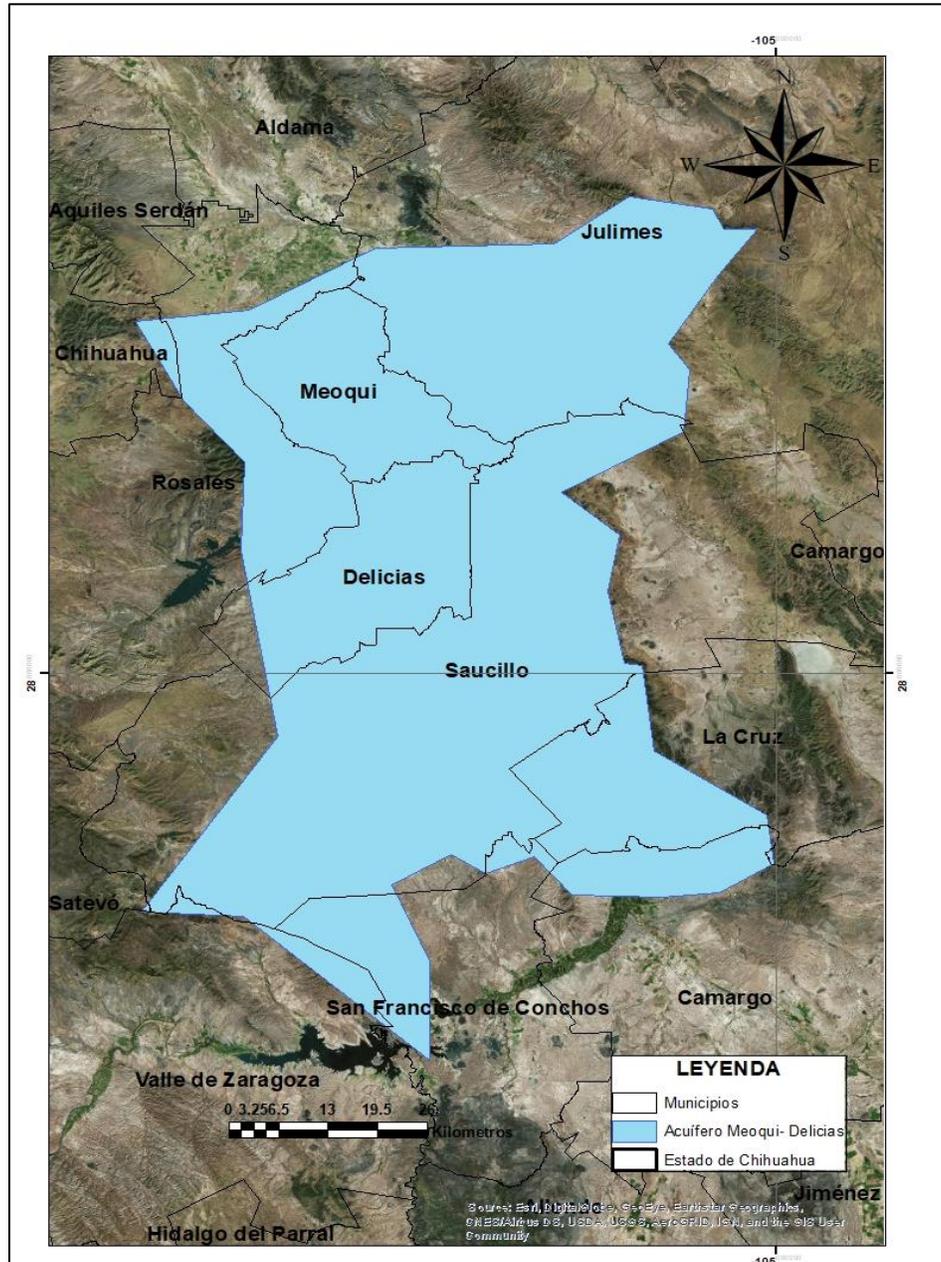


Figura 3.1. Ubicación del acuífero Meoqui- Delicias con respecto a los municipios del estado de Chihuahua.

La porción norte del acuífero presenta los valores más elevados de arsénico (Barrera, 2008), sobre todo en la zona comprendidas entre los municipios de Meoqui y Julimes (Figura 3.2); esta es la razón por la que se decidió realizar esta investigación con muestras de agua subterránea del municipio de Julimes.

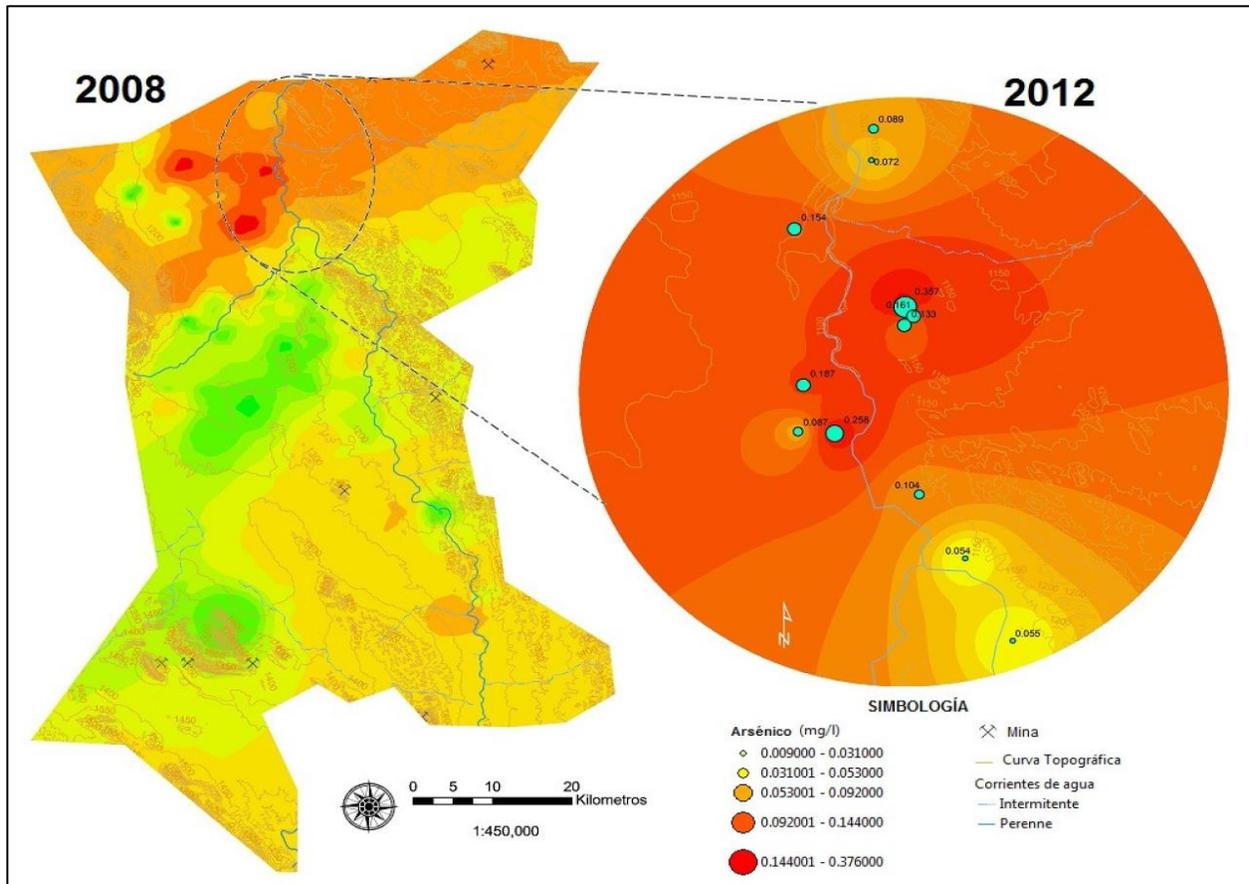


Figura 3.2. Presencia de arsénico en el acuífero Meoqui- Delicias (Tomada de Domínguez, 2013).

El municipio de Julimes se encuentra en la porción centro-oriente del estado de Chihuahua (Figura 3.3), en la latitud norte  $28^{\circ} 25'$  y los  $105^{\circ} 02'$  de latitud oeste a una altitud de 1,145 metros sobre el nivel del mar. Colinda al norte con Aldama, al este con Camargo y Ojinaga, al sur con Meoqui y Saucillo y al oeste con Rosales y Aquiles Serdán. La cabecera municipal se encuentra a 85 kilómetros aproximadamente de la capital del estado. Comprende una superficie de 4,123.68 km<sup>2</sup>.

Según el censo de población y vivienda realizado por el INEGI en el año 2010, el municipio de Julimes cuenta con una población de 4,953 habitantes.

Los principales núcleos de población son: Julimes, cabecera municipal y las localidades de La Regina, Colonia Esperanza, Labor Nueva, Boquilla, Rancho Arenillas, Ejido Julimes y Charco de Peña. Las más de 50 localidades del municipio son rurales y

aproximadamente el 80% de ellas están conformadas por menos de 20 habitantes (Tabla 3.1).

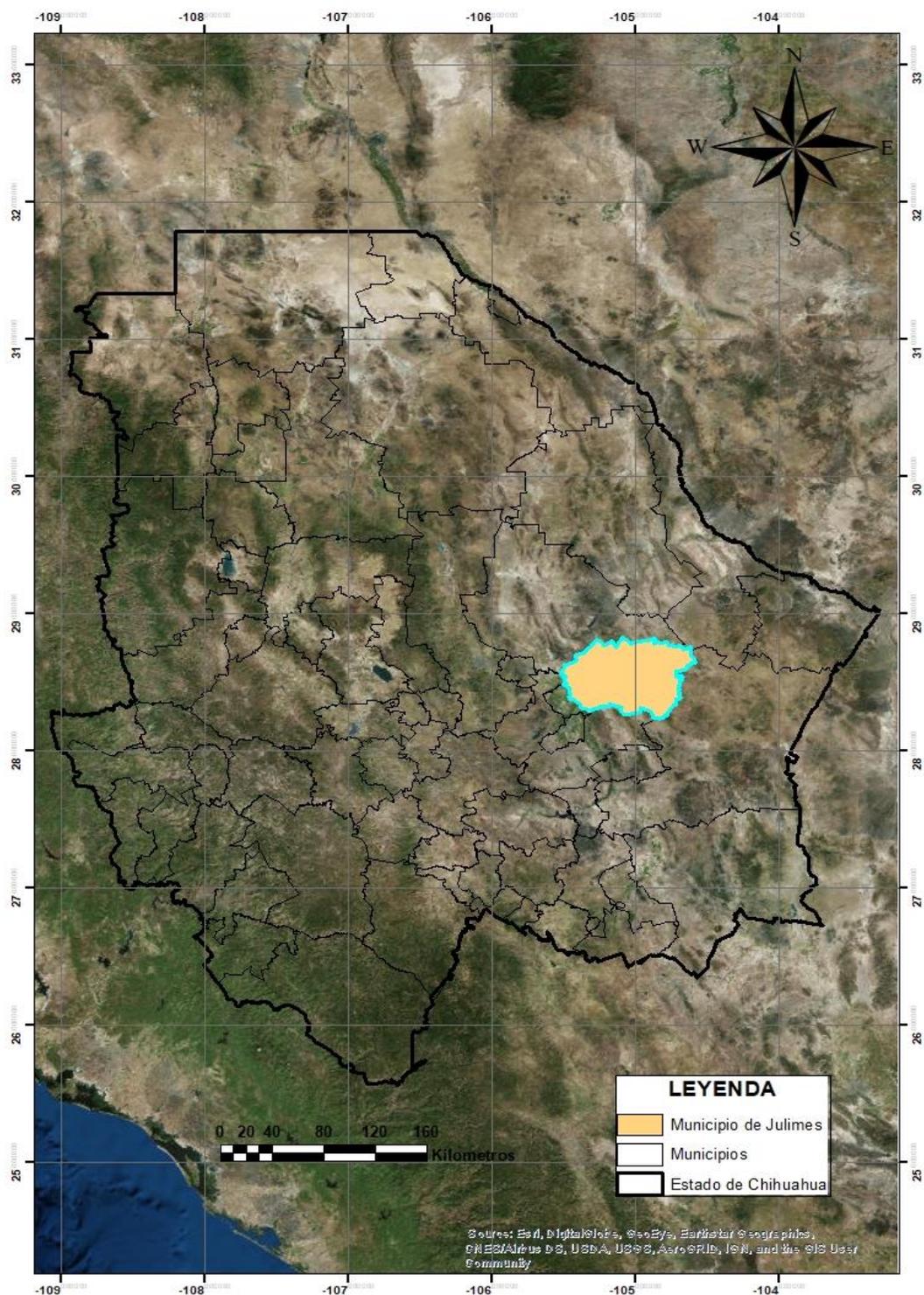


Figura 3.3. Localización del municipio de Julimes.

Tabla 3.1. Localidades en el municipio de Julimes (Tomada de Domínguez, 2013).

CLAVE	NOM_LOC	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD	POBTOT
0000	Total del Municipio				4953
0001	Julimes	105°25'50"	28°25'23"	1120	1795
0041	La Regina	105°27'06"	28°24'48"	1111	739
0012	Colonia Esperanza	105°27'16"	28°26'50"	1105	509
0095	Colonia San José	105°26'25"	28°23'01"	1120	509
0028	Hacienda Humboldt (Ejido Julimes)	105°25'02"	28°22'39"	1120	344
0029	Labor Nueva	105°27'25"	28°28'38"	1110	262
0005	Arenillas	105°22'56"	28°19'24"	1126	195
0009	La Boquilla	105°27'11"	28°29'21"	1107	174
0010	El Carrizo	105°25'39"	28°28'55"	1109	132
0025	El Gramal	105°23'51"	28°20'55"	1123	127
0093	El Carnereño	105°26'07"	28°37'21"	1077	19
0082	El Rinconeño	105°26'13"	28°27'58"	1100	18
0035	Las Palmas	104°50'27"	28°40'54"	1450	13
0018	Charco de Peña	104°58'46"	28°30'35"	1460	12
0122	La Tórtola	105°25'16"	28°23'44"	1110	11
0164	Rancho San Antonio	105°25'35"	28°25'50"	1120	6
0051	Trincheras	104°59'18"	28°44'19"	1240	5
0022	El Dorado (Peña Blanca)	105°25'30"	28°37'23"	1080	4
0027	El Jateado	105°10'33"	28°42'58"	1258	4
0066	Felipe Ángeles (El Uno)	105°03'02"	28°39'41"	1320	4
0075	Rancho Gallardo	105°28'00"	28°23'27"	1139	4
0081	Rancho de Franco	105°26'08"	28°27'19"	1102	4
0090	El Becerro	104°39'03"	28°36'44"	1316	4
0102	El Ranchito	105°25'58"	28°25'55"	1110	4
0153	Rancho Santos	105°30'22"	28°28'46"	1129	4
0019	El Cholome	105°26'07"	28°37'11"	1085	3
0023	El Cuatro	104°57'00"	28°38'39"	1300	3
0078	Rancho Blanco (Rancho la Flor)	105°27'07"	28°22'46"	1137	3
0096	Cruz Valles	105°27'46"	28°23'24"	1137	3
0113	Cerro Solo	104°56'07"	28°26'13"	1500	3
0014	La Coyota	104°51'54"	28°22'34"	1700	2
0043	Río Escondido (Rincón de la Señora)	105°25'22"	28°31'33"	1119	2
0046	San José del Carrizo (El Carrizo Viejo)	105°22'09"	28°35'09"	1181	2
0056	El Apache	105°08'43"	28°30'30"	1351	2
0067	Rancho Blanco (San Ignacio)	105°09'33"	28°36'45"	1419	2
0070	Las Burras	105°26'55"	28°30'05"	1113	2
0086	Rancho San Jorge	105°14'30"	28°28'54"	1280	2
0135	El Mezquite	105°27'48"	28°22'46"	1139	2
0150	Santa María (Cerro Solo)	104°53'52"	28°26'30"	1517	2
0015	El Cubano	104°44'17"	28°40'54"	1264	1
0026	El Jaral	105°26'07"	28°27'14"	1102	1
0031	El Manzano	104°45'53"	28°23'39"	1520	1
0033	Los Órganos	104°47'11"	28°19'36"	1594	1
0040	Puerto del Lobo	105°04'57"	28°31'09"	1418	1
0100	Juan Gómez	105°27'25"	28°23'14"	1134	1
0104	Los Zubía	105°26'49"	28°33'21"	1108	1
0147	Las Motas	105°07'22"	28°41'12"	1311	1
0148	Rancho Noriega	104°57'02"	28°20'27"	1348	1
0158	El Dos	104°39'19"	28°39'51"	1280	1
0162	Rancho Aguilar	105°26'08"	28°27'10"	1103	1
0165	Rancho el Álamo	105°27'25"	28°24'10"	1132	1
9999	Localidades de dos viviendas				17
9998	Localidades de una vivienda				72

### 3.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA

El sistema de destilación solar utilizado en este proyecto fue construido en el año 2016, como tesis de maestría en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (Dagda, 2017). Se realizó un análisis del sistema y se prosiguió a su modificación y acondicionamiento para facilitar su operación.

El destilador solar utilizado se trata de un sistema de doble vertiente (Figura 3.4). Este diseño es de operación simple, permite una rápida adecuación al medio, así como una pronta estabilización. Su doble caseta concede un mayor aprovechamiento de la energía solar, ya que sus cubiertas se encuentran dirigidas en dos direcciones, por lo que su eficiencia es mayor, comparada con otros sistemas simples (Dagda, 2017).

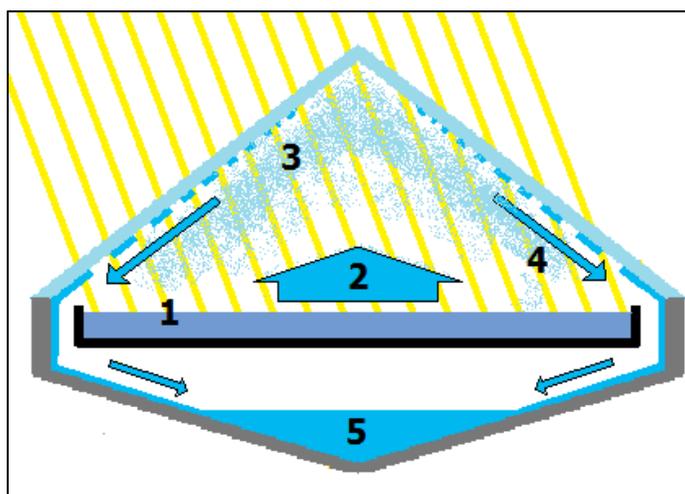


Figura 3.4. Esquema de un destilador solar de doble caseta. 1) Agua a destilar; 2) Evaporador; 3) Condensador; 4) Condensado; 5) Destilado. (Tomada de sitiosolar.com)

#### 3.2.1 Descripción del destilador solar

El destilador solar usado en esta investigación es una estructura de forma cuadrada que mide 1 metro por cada lado, es decir que proporciona un área de 1 m<sup>2</sup>. La charola fue construida utilizando lámina de acero inoxidable calibre 18, cuyo fondo fue cubierto con pintura de color negro mate resistente a altas temperaturas para incrementar la absorción de la radiación solar. La cubierta del destilador está conformada por vidrio de 3 mm de

espesor colocado a dos aguas con una inclinación de 20 grados respecto a la horizontal (Dagda, 2017).

Las partes con las que cuenta el destilador solar fueron seleccionadas y construidas bajo la rigurosa supervisión del procedimiento y materiales. Para su elaboración, se recurrió a mano de obra calificada, para así asegurar la mayor calidad del producto terminado (Dagda, 2017).

El destilador solar cuenta con los siguientes componentes:

1. Colector solar
2. Bandeja de agua
3. Cubierta
4. Agarraderas en cubierta
5. Ventanas laterales
6. Ventanas superiores
7. Estructura metálica
8. Canales
9. Tubo recolector

### **3.2.2 Ubicación del área de trabajo**

Para el inicio de la investigación fue importante la selección del área en la que se llevaría a cabo el experimento. El objetivo principal de la selección era elegir un lugar de fácil acceso para la recolección de muestras, así como para la toma de datos, y que a su vez proporcionara las condiciones ambientales necesarias para obtener una eficiencia elevada del destilador, es decir, una buena relación con respecto a la calidad y cantidad del destilado.

La ciudad de Chihuahua se consideró ideal para instalar el destilador, ya que presenta condiciones favorables para obtener la máxima eficiencia, entre las cuales destaca la alta incidencia de radiación solar durante prácticamente todo el año.

Por lo anterior se decidió instalar el destilador en el Fraccionamiento Atenas en la Ciudad de Chihuahua, Chihuahua (Figura 3.5).

El sistema se colocó en el patio delantero de una vivienda, donde no existían riesgos de daño en el equipo y las obstrucciones en la radiación solar eran mínimas.



Figura 3.5. Ubicación del destilador solar en la ciudad de Chihuahua (Google Earth, 2018).

### 3.3 ACONDICIONAMIENTO DEL SISTEMA

Como se mencionó con anterioridad, el destilador solar fue construido y probado en el año 2016 (Figura 3.6). Para la operación del sistema en esta investigación fue necesaria la rehabilitación del mismo conforme se describe a continuación.



Figura 3.6. Destilador solar en proceso de montaje en el año 2016 (Tomada de Dagda, 2017).

### 3.3.1 Selección de materiales

Para la selección de los materiales necesarios para llevar a cabo la rehabilitación y modificación del sistema se hizo una revisión de los utilizados para su fabricación previa.

En el mercado existe una gran variedad de materiales que cumplen con las características necesarias para su uso en la rehabilitación del destilador solar; sin embargo, se tomó en cuenta principalmente que fueran productos de fácil acceso, a fin de que los potenciales usuarios del sistema pudieran adquirirlos sin dificultad.

A continuación, se detallan los materiales empleados para la modificación y rehabilitación del sistema (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Materiales utilizados para la modificación y rehabilitación del sistema

Nombre	Descripción	Cantidad	Unidad
<b>Polín metálico</b>	C100 de 5 cm de ancho y 5 metros de largo	1	Pieza
<b>Tornillos</b>	1" largo x 1/2" calibre	14	Pieza
<b>Pintura</b>	Metálica anticorrosión color negro	2	Litro
<b>Silicón</b>	En frío resistente a la humedad y calor	4	tubo
<b>Tinner</b>	Bote de 1 litro	1	Litro
<b>Manguera</b>	De plástico calibre 20, 60 cm de largo	1	Pieza
<b>Pestillo de palanca</b>	De acero inoxidable	2	Pieza
<b>Bidón</b>	De plástico capacidad 5 litros	1	Pieza

<b>PVC</b>	Tubo de 2 pulgadas de diámetro	1	Pieza
<b>Madera</b>	115 cm de largo, 14 cm de ancho, ½ pulgada de grosor	1	Pieza
<b>Bisagras</b>	Bisagra ligera galvanizada 3.5"x3.5"	2	Pieza
<b>Embudo</b>	De plástico, 15 centímetros de alto	1	Pieza

### 3.3.2 Modificación del equipo

El destilador solar consta de una estructura metálica de gran peso, al igual que la cubierta, la cual, como se mencionó con anterioridad, es de vidrio. El diseño inicial del destilador no era apropiado para personas con poca fuerza, ya que, para colocar agua en la charola, era necesario levantar la cubierta. Por este motivo se decidió realizar cambios en la estructura que permitieran que su manejo fuera más práctico y adecuada para cualquier persona.

Las modificaciones que se realizaron al sistema fueron las siguientes:

#### 1. Puerta

Para lograr un manejo más práctico del equipo se decidió agregar una puerta por la cual se pudiese extraer la charola del destilador y así verter el agua sin necesidad de levantar la estructura superior. Ésta se realizó de madera, cuyas medidas son 115 cm de largo por 14 cm de ancho. La puerta se cubrió de plástico adherente para evitar su deterioro por la humedad, tanto en su cara interna, como en la externa.

Para asegurar que la puerta sellara correctamente y evitar que el vapor se escapara, se colocó un empaque entre la estructura y la puerta. Y para cerrar ésta, se colocaron pestillos de palanca, uno en cada lado.

Para ello se agregó una base de polín (de 5 cm de ancho y 5 metros de largo) alrededor de la estructura inicial, en la cual se realizó la perforación de la puerta en uno de los lados (Figura 3.7). El polín fue cortado y doblado a medida para su correcta colocación. Se aseguró a la estructura mediante tornillos y fue soldado en las zonas requeridas, teniendo especial cuidado de no dañar la misma y evitar la fuga de vapor de agua.

En las uniones del polín a la estructura se colocó silicón para sellar completamente el sistema.

## **2. Canales**

Los canales colectores del destilado fueron reemplazados, para lo cual se utilizó un tubo de PVC de dos pulgadas de diámetro, el cual fue cortado a medida para colocarlo en 3 de los lados del destilador.

Para que se diera el escurrimiento de agua de un canal a otro, éstos se colocaron a distinta altura, y a cada canal se le dio la pendiente adecuada.

Los canales fueron fijados al vidrio de la cubierta mediante silicón resistente a humedad y temperaturas altas.



Figura 3.7. Destilador solar con la modificación en su estructura.

## **3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### **3.4.1 Inicio de la operación del destilador**

Una vez concluidas las modificaciones en el sistema se prosiguió con la instalación para dar inicio a la operación del mismo. Se colocó en el interior del sistema un embudo para dirigir el destilado desde los canales hacia la manguera por la cual drenaba el agua en dirección al bidón de 5 litros en el cual ésta se almacenaba.

El destilador se encontraba direccionado a manera de asegurar la mayor incidencia de la radiación solar, es decir, que sus dos ventanas mayores apuntaran hacia el amanecer y el crepúsculo.

Para la operación del destilador se siguieron una serie de pasos, mismos que se describen a continuación:

#### 1. Alimentación del destilador

El destilador solar se alimentó con el agua a tratar. Para tener un correcto control del afluente que ingresaba en el destilador se alimentaron diariamente 3 litros de agua. Esta operación se llevó a cabo durante la noche anterior a la colección de cada destilado para asegurar la mayor incidencia de radiación diurna en el equipo. La operación de carga se realizó a través de la puerta que se instaló en el sistema, la cual se abría para retirar la charola, deslizándola, y colocar en ella el agua a destilar. Posteriormente la puerta era cerrada, asegurando que quedara completamente sellada para evitar fugas del vapor.

#### 2. Recolección del destilado

La recolección diaria del destilado se llevó a cabo por las noches con la finalidad de que el destilador alcanzara la temperatura ambiente y todo el vapor producido lograra condensarse. Se procedía a retirar el bidón donde el destilado era almacenado para colocar éste en un recipiente graduado, con el fin de medir el volumen obtenido cada día. El destilado obtenido se separaba en dos botellas de 500 ml, las cuales fueron almacenadas en el frigorífico para su posterior análisis.

#### 3. Análisis de muestras

Una vez que el destilado era almacenado en el frigorífico, en el volumen restante se analizaban los parámetros conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT) con un equipo portátil Sension 5 marca HACH (Figura 3.8).

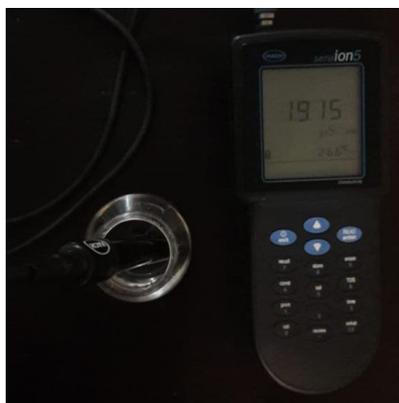


Figura 3.8.- Medidor portátil de CE y SDT.

### **3.4.2 Pruebas preliminares con agua potable de la ciudad de Chihuahua**

Durante la etapa de estabilización del sistema, se buscó que los resultados en la medición de la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales no tuvieran variaciones considerables de un día a otro de operación del sistema.

Estas pruebas se efectuaron entre el 4 y 8 de agosto del 2018 con agua procedente de una toma domiciliar de agua potable de la ciudad de Chihuahua. En los 5 días mencionados se logró obtener los resultados pretendidos, por lo que se concluyó que la operación del equipo era estable.

Al reconocer que la variación en los resultados no era significativa se decidió suspender la carga del equipo con agua de la ciudad de Chihuahua y comenzar la carga con agua del municipio de Julimes, dando así inicio a la segunda etapa del experimento.

### **3.4.3 Traslado de agua con arsénico procedente del municipio de Julimes**

El día 7 de agosto de 2018 se acudió en vehículo al municipio de Julimes para la recolección de muestras de agua subterránea. Previamente se revisaron resultados de estudios anteriores y se ubicaron los pozos con mayor concentración de elementos dañinos a la salud, como lo son el flúor y el arsénico, entre los cuales destacaron los de Julimes, San José, La Regina y La Esperanza. El muestreo se realizó en las 3 últimas localidades, mismas que se ubican en la Figura 3.9.

Las muestras de agua se colectaron en tomas domésticas de cada una de las localidades señaladas, almacenándolas con especial cuidado en bidones de 20 litros para evitar su contaminación y trasladarlas a la ciudad de Chihuahua.

En la localidad San José también se colectaron muestras del efluente de la planta purificadora de ósmosis inversa instalada por la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS).



Figura 3.9. Localización de pozos para colección de muestras (Google Earth, 2018).

#### **3.4.4 Operación del destilador con agua de pozos de Julimes**

Una vez que la etapa de prueba de operación del equipo se concluyó satisfactoriamente se procedió a destilar agua de los tres pozos muestreados en el municipio de Julimes, es decir en las localidades de La Regina, La Esperanza y San José.

Durante esta etapa también se midió cada dos horas la temperatura externa, así como la temperatura del agua en la charola y de la cámara de evaporación. Las mediciones se efectuaron con un sensor a base de termopares metálicos y pantalla digital (Figura 3.10), perteneciente al Laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería. Las lecturas se iniciaron en cada caso a las 8:00 am, concluyendo a las 6:00 pm, hora a la cual ya no se contaba con vapor de agua dentro del sistema.

Se registró también la información climática diaria cada 2 horas. Esta información se procesó para obtener un promedio diario, y así relacionar estos factores con el rendimiento del sistema.

Además de las mediciones *in situ* de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos, se almacenaron muestras para análisis de arsénico y flúor. El arsénico fue analizado en el Servicio Geológico Mexicano y el Laboratorio de Química Analítica III de la Facultad de Ciencias Químicas. En el último caso se empleó un equipo de absorción atómica con generador de hidruros a cargo de la Dra. María de Lourdes Ballinas Casarrubias. El flúor se analizó en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería, así como también en el Cromatógrafo de Iones ICS 1100 marca Dionex a cargo de la Dra. Beatriz Rocha Gutiérrez en el Laboratorio de Química III de la Facultad de Ciencias Químicas. Con este mismo equipo fueron medidas también las concentraciones de otros aniones como cloruros, nitratos y sulfatos, tanto en las muestras de agua de los pozos como en los destilados de las tres localidades.



Figura 3.10.- Sensor de temperatura a base de termopares.

El proceso de destilación para cada pozo de describe a continuación:

### ***La Regina***

Se comenzó a destilar agua del pozo La Regina el día 09 de agosto. Sin embargo, debido a problemas que se presentaron en los canales, se suspendió la operación mientras que éstos fueron reemplazados, continuando con la misma los días 13 y 14 de agosto.

### ***San José***

El día 16 de agosto se comenzó a destilar agua del pozo San José. Para realizar el cambio de agua de pozo se secaron completamente la charola y el vidrio del destilador donde se acumuló el condensado para así evitar la contaminación proveniente del pozo anterior. La destilación de agua de este pozo se llevó a cabo durante 6 días; sin embargo, no fueron continuos. Las primeras cuatro muestras se colectaron los días 16, 17, 18 y 19 de agosto, mientras que las otras dos, fueron obtenidas los días 9 y 10 de septiembre.

### ***La Esperanza***

Para proseguir con la destilación de agua del pozo La Esperanza se tomaron las medidas antes mencionadas para evitar la contaminación con agua del pozo anterior. La destilación en este caso se llevó a cabo durante cuatro días, 25, 26, 28 y 29 de septiembre; el día 27 también se destiló, sin embargo, los resultados no se tomaron en cuenta, por no contar con los datos de temperatura.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ETAPA I: PERIODO DE PRUEBA CON AGUA POTABLE

En esta etapa, como se mencionó con anterioridad, se destiló agua potable de la ciudad de Chihuahua. Los resultados que se presentan a continuación son producto de 5 días de operación, en los cuales se alcanzó la variación mínima entre cada parámetro medido.

Tabla 4.1. Parámetros medidos en la Etapa 1

Fecha	Agua potable		Destilado	
	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	SDT ( $\text{mg}/\text{l}$ )	CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	SDT ( $\text{mg}/\text{l}$ )
04/08/2018	382	268	79.7	55.8
05/08/2018	386	270	33.9	23.8
06/08/2018	384	269	19.99	14
07/08/2018	391	273	19.05	13.3
08/08/2018	387	271	27.7	19.4
Promedio	386	270.2	36.068	25.26

En la Tabla 4.1 se observa la variación de la conductividad eléctrica y de los sólidos disueltos totales, La comparación entre ambos parámetros muestran que la remoción de salinidad en términos de conductividad eléctrica es de 90.62%, mientras que en términos de sólidos disueltos totales es de 90.63%.

En la Figura 4.1, se aprecia el comportamiento del sistema de destilación solar durante los 5 días de duración de esta etapa. Se puede observar que el primer día del experimento el porcentaje de remoción fue menor, y a partir del día dos, la remoción mejoro, manteniéndose prácticamente constante.

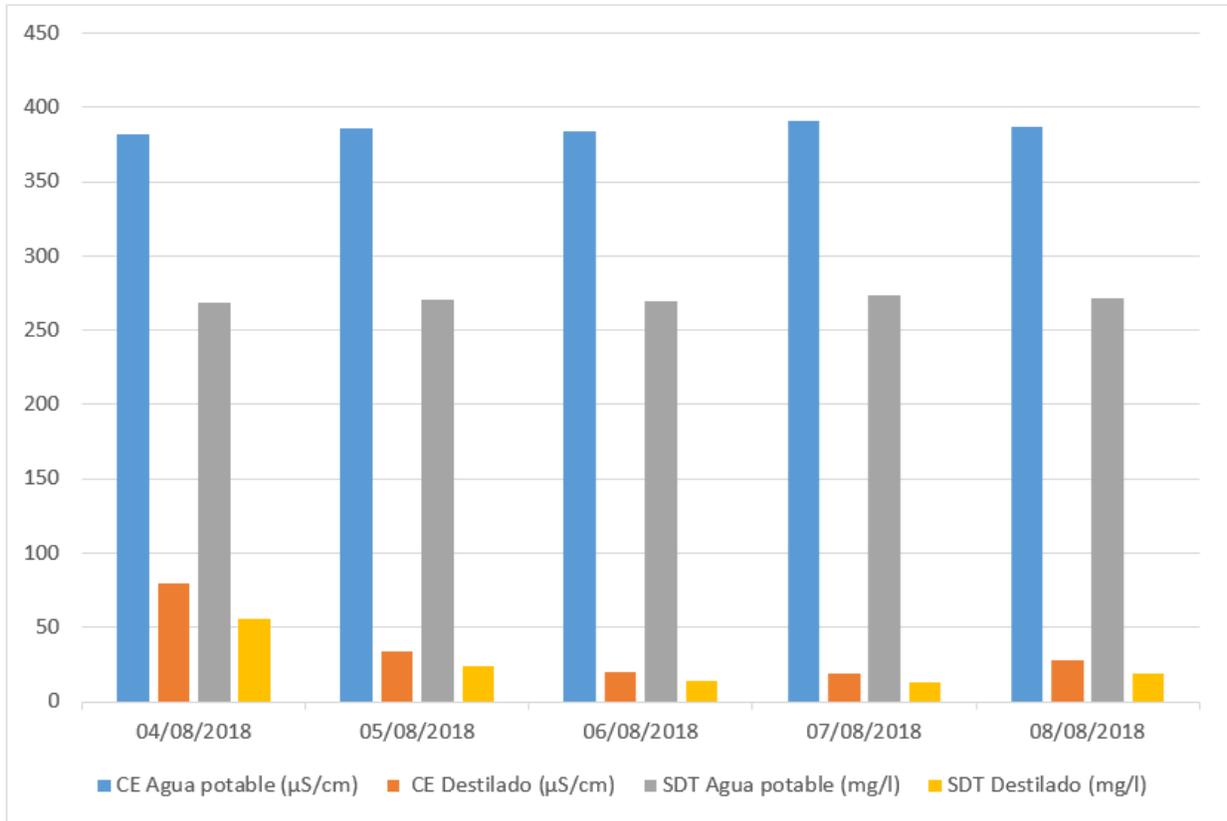


Figura 4.1. Valores de CE y SDT reportados en las muestras de la Etapa I.

Con la información anterior se muestra que en los 5 días de esta etapa el sistema de destilación solar alcanzó la estabilidad necesaria para continuar el experimento con agua del acuífero Meoqui-Delicias, ya que los parámetros medidos en el destilado muestran una variación mínima.

Es importante mencionar que esta etapa no se recabó información climática, puesto que lo que se buscaba era la estabilidad del sistema.

## 4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA ETAPA II: OPERACIÓN DEL SISTEMA CON AGUA DE JULIMES

Una vez que los parámetros medidos en la etapa I (CE y SDT) tuvieron una diferencia despreciable y se alcanzó la estabilidad del sistema de destilación solar se prosiguió con la Etapa II, en la cual se destiló agua del acuífero Meoqui-Delicias procedente de las comunidades San José, La Regina y La Esperanza. Los resultados se analizarán en ese orden.

### 4.2.1 ANÁLISIS DEL DESTILADO SAN JOSÉ

Se analizará en primer lugar el destilado San José, ya que es la localidad de la cual recabó mayor cantidad de información. Los resultados presentados a continuación se obtuvieron a lo largo de 6 días de destilación; para fines prácticos se dio a cada muestra un código de identificación (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Tabla de identificación de las muestras San José.

SAN JOSÉ	
Fecha	ID
07-ago	Pozo
16-ago	D-1
17-ago	D-2
18-ago	D-3
19-ago	D-4
09-sep	D-5
10-sep	D-6

Los parámetros medidos inicialmente son CE y SDT, ya que fueron los que determinaron la estabilidad del sistema. En la Figura 4.2 se observa la variación en las mediciones de CE en el agua del pozo y en el destilado. Se puede observar como los valores de los destilados no sobrepasan los 25  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en comparación a los 2140  $\mu\text{S}/\text{cm}$  medidos en el pozo, lo cual es un indicio de la considerable disminución en la salinidad del agua.

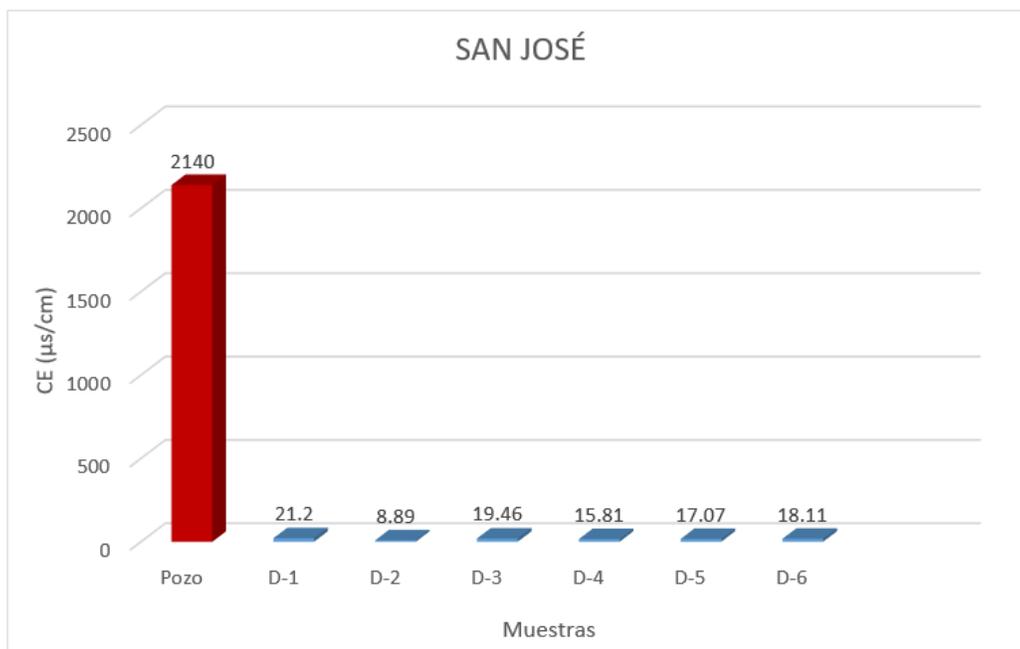


Figura 4.2. Datos de CE medidos a las muestras San José.

La Tabla 4.3 muestra una comparación importante entre los valores de CE y SDT promedio medidos en el destilado y los mismos parámetros medidos en otros tipos de agua.

Tabla 4.3. Resultados de CE y SDT medidos en distintos tipos de agua

	CE (µS/cm)	SDT (mg/l)
Pozo San José	2140	1497
Planta de Ósmosis Inversa	41.90	29.30
Agua embotellada	23.2	16.3
Agua de lluvia	25	17
Destilado agua potable de Chihuahua	20	14
Destilado agua de San José (promedio)	16.8	11.7

En la tabla anterior se puede ver un dato relevante, y es que la remoción de salinidad en función de CE y SDT es alta, permitiendo así obtener agua de mejor calidad en función a estos parámetros que la presentada por la planta de ósmosis inversa instalada en la localidad, agua embotellada comercial, agua de lluvia y destilado de agua potable de la ciudad de Chihuahua (éste obtenido en la Etapa I del experimento).

Tabla 4.4. Resultados del análisis de calidad para las muestras San José

PARÁMETROS	POZO (07/08/2018)	PLANTA ÓSMOSIS INVERSA	DESTILADO (D-4)
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	2140	41.9	15.81
SDT (mg/l)	1497	29.3	11.1
As	0.194	0.003	<0.001
F <sup>-</sup>	7.42	0.27	0.21
Cl <sup>-</sup>	172.74	-	ND
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	589.12	-	ND
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	30.72	-	ND

En la Tabla 4.4 se presenta la comparación de los resultados de algunos aniones, CE, SDT y As medidos en la muestra D-4, agua del pozo San José y agua de la planta de ósmosis inversa.

De esta tabla se pueden obtener varios puntos relevantes:

- El arsénico (As) presente en el pozo es de 0.194 mg/l, por lo que sobrepasa el límite de 0.025 mg/l establecido por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994.
- El Flúor (F) presente en el pozo es de 7.42 mg/l, por lo que también sobrepasa el límite de 1.5 que establece la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994.
- Los SDT presentes en el pozo muestran un valor de 1497 mg/l, sobrepasando el límite de 1000 mg/l, establecido por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994.
- Los sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) medidos en el pozo, presentan un valor de 589.14 mg/l, sobrepasando así el límite impuesto por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 de 400 mg/l).
- De los parámetros medidos en el agua del pozo, únicamente los cloruros (Cl<sup>-</sup>) y los nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) están dentro del rango impuesto por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994.

De lo anterior se puede decir que la calidad del agua en la muestra D-4 mejora considerablemente al someterse a la destilación solar. Se observa un porcentaje de remoción de STD del 99.25%, de los cationes (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Cl<sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) un porcentaje de 100%, ya que como se puede observar no fueron detectados. El flúor y el arsénico, elementos sumamente dañinos a la salud, presentan un porcentaje de remoción de 97.18% y 99.5% respectivamente.

Las demás muestras presentaron resultados similares con respecto a As y F; los porcentajes de remoción de arsénico son del 100% (Figura 4.3), mientras que los de flúor, oscilan entre el 97.18% y el 99.19% (Figura 4.4).

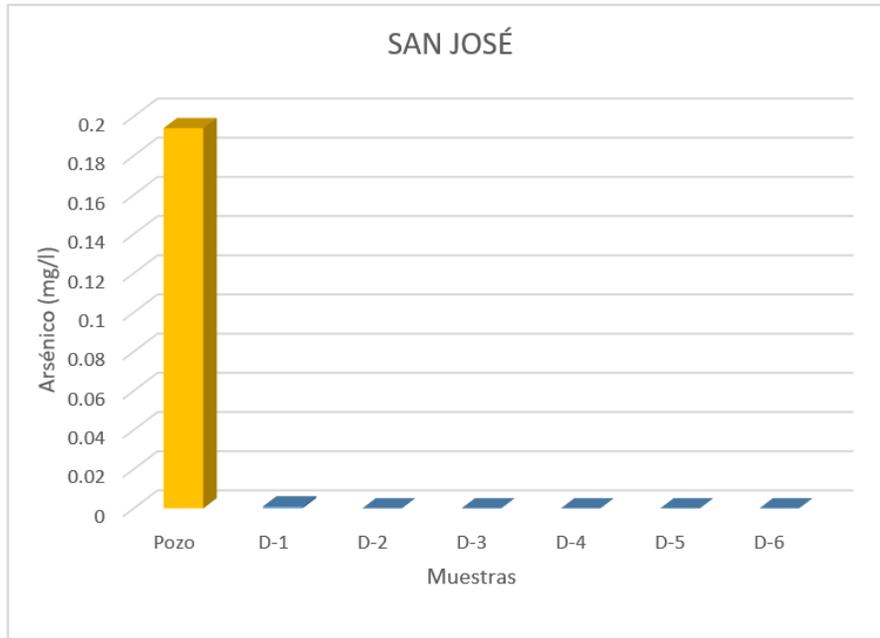


Figura 4.3. Concentraciones de arsénico en las muestras San José.

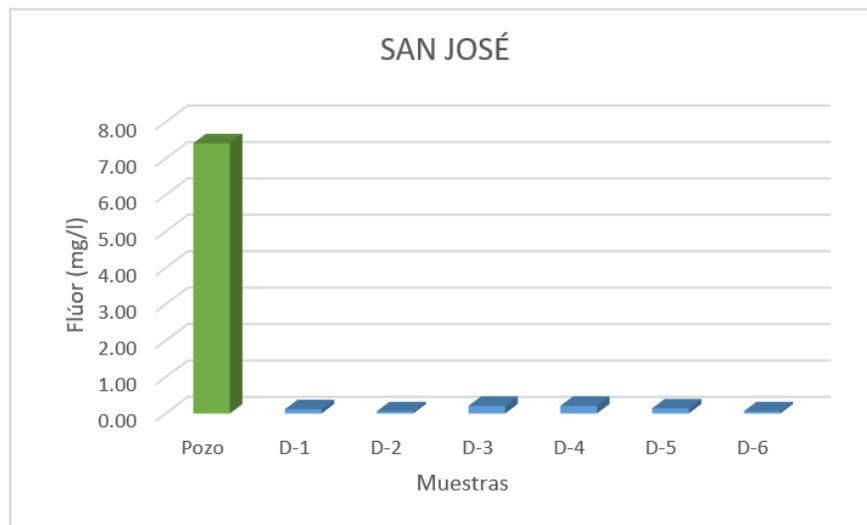


Figura 4.4. Concentraciones de flúor en las muestras San José.

En esta etapa del experimento también se registró la información climática por día (Tabla 4.5), para así lograr una relación entre ésta y los parámetros de calidad del agua.

Tabla 4.5. Valores de parámetros climatológicos durante la destilación de agua del pozo San José.

Fecha	16/08/2018	17/08/2018	18/08/2018	19/08/2018	09/09/2018	10/09/2018
Temperatura máxima (°C)	31	30	31	31	26	28
Temperatura mínima (°C)	21	22	19	21	16	20
Viento medio (km/hr)	2	3	3	4	8	11
Dirección del viento	Este	Noroeste	Noroeste	Noroeste	Noreste	Noreste
humedad (%)	44	51	36	37	48	47
nubosidad (%)	19	61	32	55	0	15
Precipitación (mm)	0	0.3	0	0	0	0

En la tabla anterior se puede observar que los datos se dividen en dos grupos: los valores obtenidos durante el mes de agosto presentan temperaturas más altas, siendo la mayor de 31°C y la menor de 21°C, y mostrando vientos provenientes del Noroeste principalmente; mientras que los valores procedentes del mes de septiembre presentan temperaturas ligeramente más bajas, siendo la mayor de 28°C y la menor de 16°C.

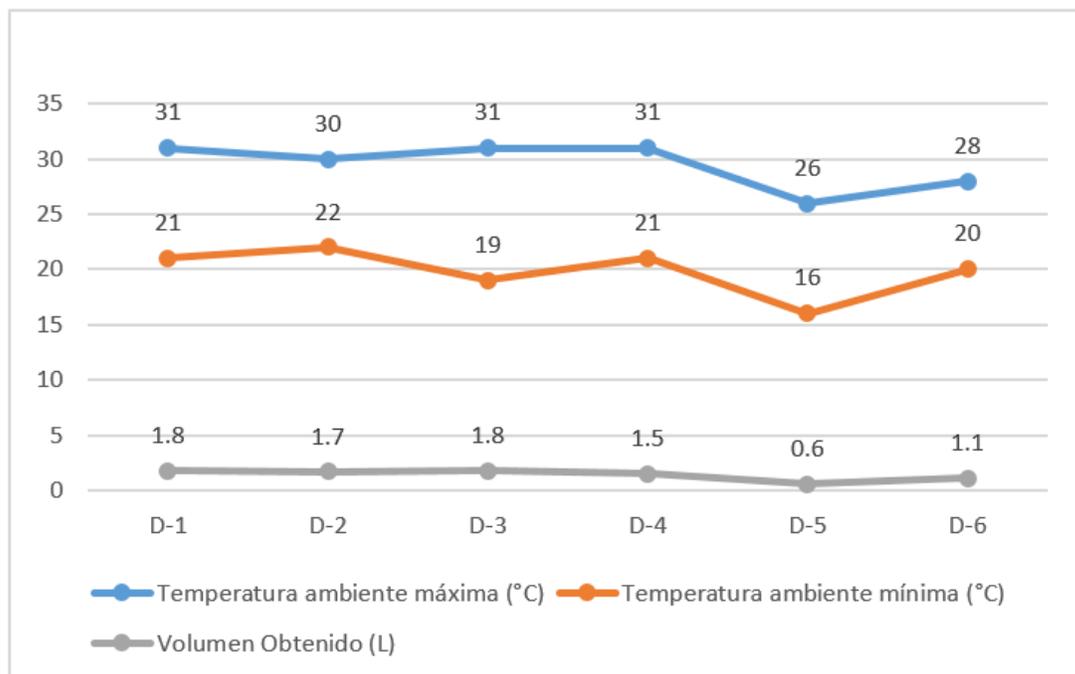


Figura 4.5. Variaciones diarias del volumen de destilado San José obtenido con relación a las temperaturas máximas y mínimas del ambiente.

La Figura 4.5 presenta las variaciones en la temperatura diaria del ambiente y su influencia en el volumen de destilado obtenido. Se puede apreciar cómo se mencionó anteriormente que en los días pertenecientes al mes de agosto las temperaturas son ligeramente más altas que en los días del mes de septiembre, y esto interviene directamente en el volumen de destilado. Durante los días con temperaturas mayores a los 30°C el volumen obtenido fue superior a 1.5 litros; mientras que en los días con temperaturas menores no se alcanzó este volumen; incluso en el día más frío únicamente se recabaron 0.6 litros.

Tabla 4.6. Temperaturas medidas en el destilador para San José

Fecha	Hora	T°C Externa	T°C Vapor	T°C Agua	Condensado	Destilado
16/08/2018	08:00	27.8	33.7	37	NO	NO
	10:00	30.4	52.7	59	SI	NO
	12:00	36.5	66	70.7	SI	SI
	14:00	35.8	64.8	68.1	SI	SI
	16:00	29.5	35.3	45	SI	SI
	18:00	27.8	28	28	NO	NO
17/08/2018	08:00	19.4	19.4	19.8	NO	NO
	10:00	23.5	33.8	35.5	NO	NO
	12:00	28	48.5	52.8	SI	SI
	14:00	27.5	39.7	49.4	SI	SI
	16:00	-	-	-	SI	SI
	18:00	27.4	27	27.4	NO	NO
18/08/2018	08:00	28.2	35.1	40	NO	NO
	10:00	31	54.3	61	SI	NO
	12:00	33.2	61	69.8	SI	SI
	14:00	36.5	66.5	71.7	SI	SI
	16:00	33.2	39.2	44.5	SI	SI
	18:00	30.8	31	31.6	NO	NO
19/08/2018	08:00	25.2	28.3	33.1	NO	NO
	10:00	29.6	45.1	48.8	SI	NO
	12:00	28	42.8	45.7	SI	SI
	14:00	36.3	66.2	70	SI	SI
	16:00	30.3	32	42	SI	SI
	18:00	28.8	30.6	32.2	NO	NO
09/09/2018	08:00	-	-	-	NO	NO
	10:00	20.7	26.8	30	NO	NO
	12:00	24.3	34.7	33.5	SI	SI
	14:00	28.2	45	52.8	SI	SI
	16:00	26	32.7	39.2	SI	SI
	18:00	23.4	24.9	25.8	NO	NO
10/09/2018	08:00	20.5	26.2	27.1	NO	NO
	10:00	22.6	32.3	41.3	SI	NO
	12:00	27.2	51.1	57.1	SI	SI
	14:00	31.8	57.5	61.3	SI	SI
	16:00	28.1	41	48.4	SI	SI
	18:00	27.4	27.8	31.2	NO	NO

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados de las mediciones realizadas al destilador cada 2 horas. Como se puede observar en la mayoría de los días, se presentó condensado en el vidrio a partir de las 10 am, y la temperatura del agua era mayor a 41°C, mientras que en el vapor superó los 45°C. Los días 17 de agosto y 9 de septiembre el condensado se presentó después de esta hora, pero como se puede observar la temperatura ambiente fue más baja y la temperatura del agua fue menor a 36°C, mientras que la del vapor de agua menor a 34°C. La última medición se realizó a las 6:00 pm, hora a la cual, como se puede observar ya no se generaba condensado por lo que el que se encontraba adherido al vidrio ya no precipitaba ni era colectado.

Es importante mencionar que los datos faltantes en la Tabla 4.6 no se pudieron obtener ya que en ambas ocasiones la lluvia lo impidió.

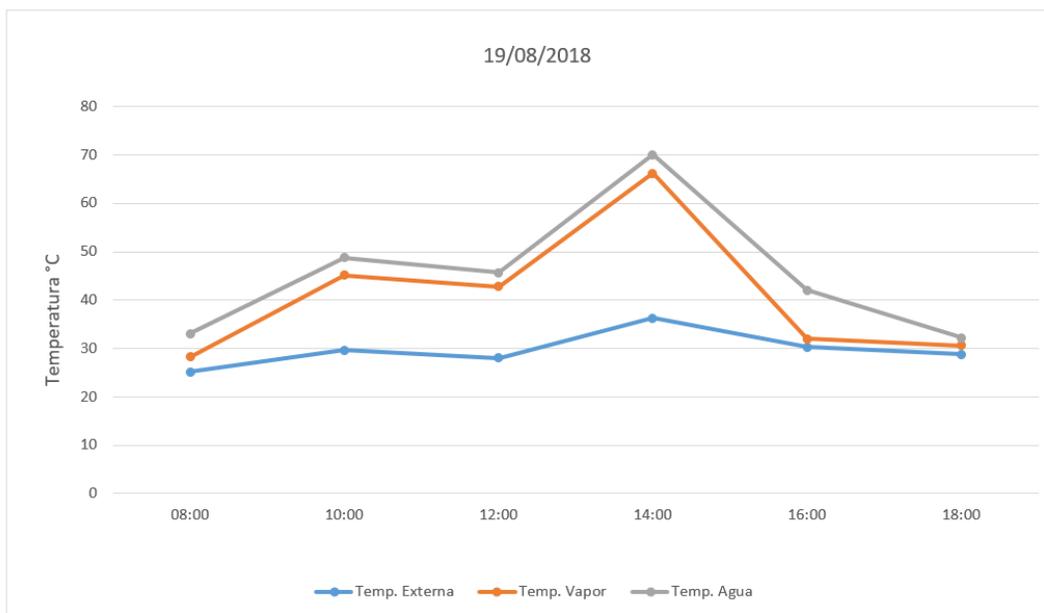


Figura 4.6. Variación de temperatura en el destilador el día 19/08/2018.

En la Figura 4.6 se puede apreciar que la temperatura del agua alcanzó el valor más alto a las 2:00 pm, la cual es de 70°C, mientras que la del vapor de agua es de 66.2 °C. En la figura también se muestra que los incrementos en la temperatura interna del destilador son proporcionales a los registrados en la temperatura externa.

#### 4.2.2 ANÁLISIS DEL DESTILADO LA REGINA

Para llegar a los resultados que se detallan a continuación fue necesario realizar una última modificación al sistema de destilación solar. Al término del primer día de experimento con agua de la Regina se identificó un problema con los canales en los canales colectores del condensado. Éstos no resistieron las altas temperaturas alcanzadas en el interior de la cámara de evaporación y sufrieron una deformación, por lo que fueron reemplazados.

Una vez solucionado el problema mencionado se continuó el experimento y se obtuvieron en total tres muestras de destilado. Estas muestras y la muestra del pozo fueron identificadas con un código que se presenta la siguiente tabla:

Tabla 4.7. Identificación de las muestras La Regina

LA REGINA	
Fecha	ID
07-ago	Pozo
09-ago	D-1
13-ago	D-2
14-ago	D-3

La conductividad eléctrica (CE) y los sólidos disueltos totales (SDT) fueron los parámetros medidos inicialmente.

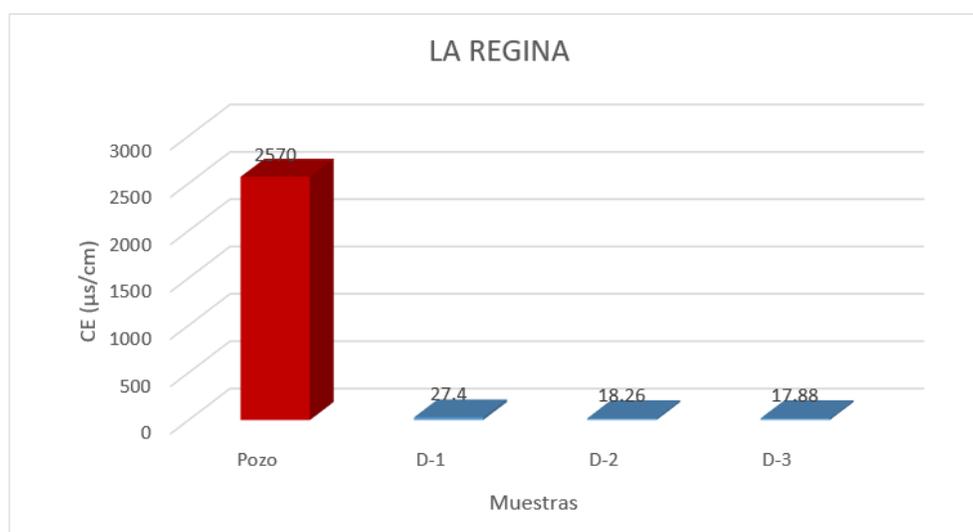


Figura 4.7. Datos de CE medidos a las muestras La Regina.

En la Figura 4.7 se puede observar que la CE en el pozo es de 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que las muestras de destilado presentan una CE que no sobrepasa los 28  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La CE es parámetro que depende directamente de las sales disueltas en el agua. En este caso se obtuvo un valor de SDT en la muestra de pozo de 1801 mg/l y en promedio en las muestras de destilado se registraron 14.83 mg/l. Esto indica para las muestras de La Regina un porcentaje de remoción de salinidad en función de estos parámetros de 99.18%.

Además de los parámetros anteriores, se midió también en todas las muestras el contenido de arsénico y flúor (Figura 4.8).

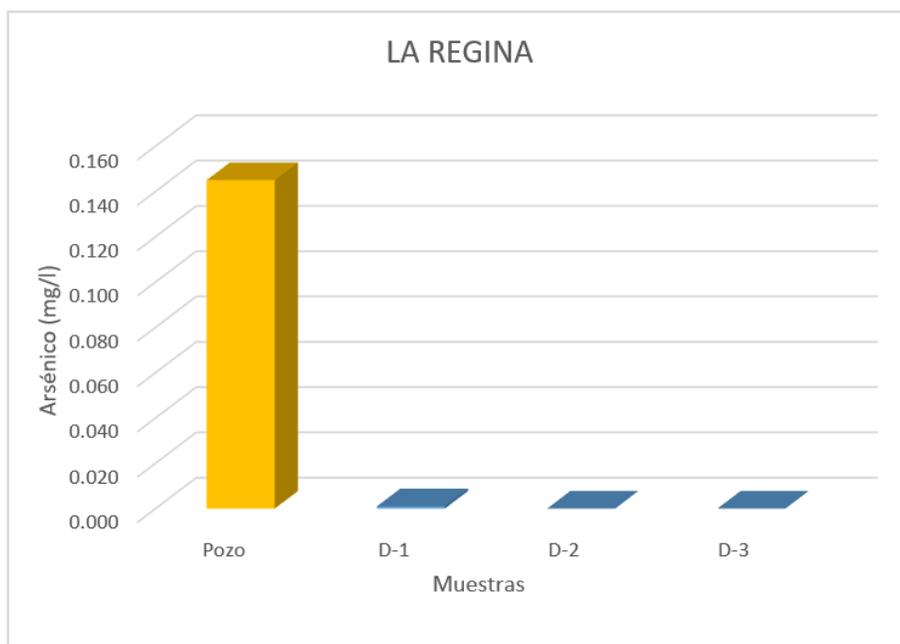


Figura 4.8. Concentraciones de arsénico en las muestras La Regina.

Como se aprecia en la Figura 4.8 el proceso de destilado genera un porcentaje de remoción promedio para arsénico del 100% ya que la muestra de pozo reporta una concentración de 0.145 mg/l, mientras que las muestras de destilado reportan <0.001 mg/l. Dicho valor es equivalente No Detectado, ya que es menor al límite de detección del equipo de Absorción Atómica utilizado para la cuantificación de este parámetro.

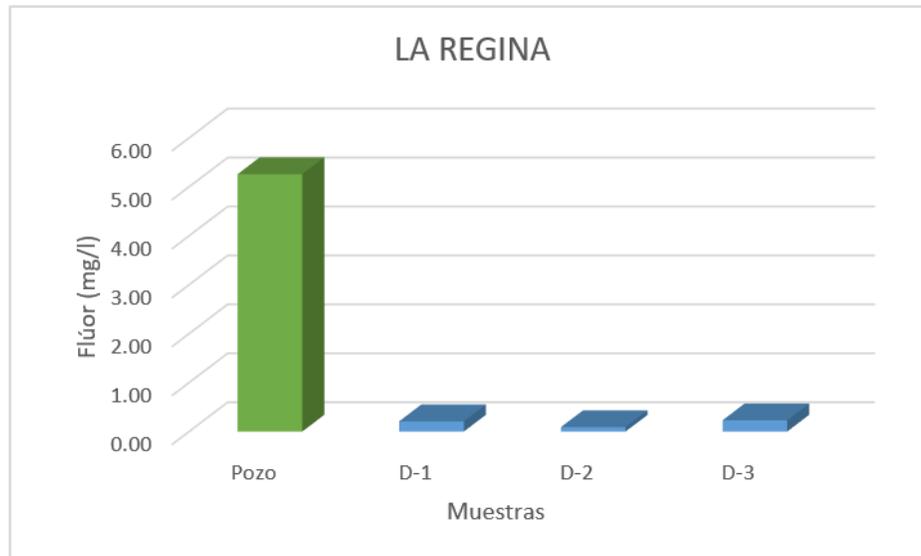


Figura 4.9. Concentraciones de flúor en las muestras La Regina.

La concentración de flúor en las muestras se observa en la figura 4.9, el porcentaje de remoción en función a este parámetro es de 96.64%.

Los resultados adquiridos en cuanto a flúor y arsénico son de gran importancia, ya que en ambos casos su presencia en la muestra tomada de pozo sobrepasa los límites establecidos por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 de 1.5 mg/l y 0.025 mg/l respectivamente. En el pozo la concentración de As fue de 0.145 mg/l y la de F de 5.26 mg/l.

La información climatológica recabada durante la etapa actual del experimento se registró en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Valores de parámetros climatológicos durante la destilación de agua del pozo La Regina

Fecha	09/08/2018	13/08/2018	14/08/2018
Temperatura máxima (°C)	27	26	26
Temperatura mínima (°C)	24	18	20
Viento medio (km/hr)	22	5	3
Dirección del viento	Este	Este	Norte
humedad (%)	70	57	63
nubosidad (%)	72	50	35
Precipitación (mm)	0	0.01	1.2

Los datos climatológicos en esta etapa del experimento muestran variaciones pequeñas en cuanto a la temperatura, siendo la más alta de 27°C mientras que la más baja registrada fue de 18°C.

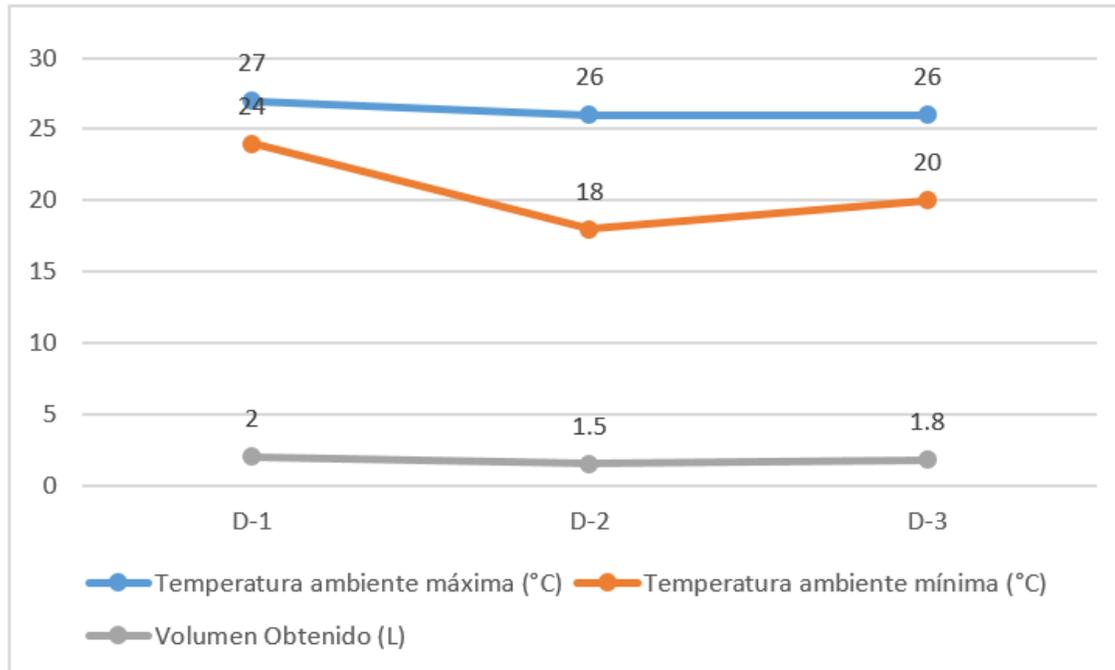


Figura 4.10. Variaciones diarias del volumen de destilado La Regina obtenido con relación a las temperaturas máximas y mínimas del ambiente.

En el gráfico mostrado en la figura anterior se observa como las variaciones en la temperatura influyen directamente en el volumen de destilado generado, aunque éstas sean mínimas. En D-1 y D-3 la temperatura tuvo una diferencia mínima y esto se reflejó en el volumen de destilado, puesto que se obtuvieron 2 L y 1.8 L respectivamente, mientras que en D-2, la temperatura mínima fue más baja comparada con los otros días, y el volumen colectado también fue menor (1.5 L).

Tabla 4.9. Temperaturas medidas en el destilador para La Regina

Fecha	Hora	T°C Externa	T°C Vapor	T°C Agua	Condensado	Destilado
09/08/2018	08:00	27.4	30.5	35.2	NO	NO
	10:00	28.7	45.1	50.6	SI	NO
	12:00	34.4	59.8	64.4	SI	SI
	14:00	33.3	55.9	59.4	SI	SI
	16:00	32.4	54.3	56.2	SI	SI
	18:00	28.4	29.7	32	NO	NO
13/08/2018	08:00	22	26.3	30.5	NO	NO
	10:00	24.8	40.6	45.9	SI	NO
	12:00	27.8	45.8	51.2	SI	SI
	14:00	31.2	61.3	68.8	SI	SI
	16:00	25.7	32.3	36.2	SI	SI
	18:00	-	-	-	-	-
14/08/2018	08:00	25.4	31.6	36.7	NO	NO
	10:00	27.8	44.2	46.6	SI	NO
	12:00	33	65.3	71.8	SI	SI
	14:00	31	68.4	71.9	SI	SI
	16:00	29	44.5	59.4	SI	SI
	18:00	26.7	26.5	26	NO	NO

En la Tabla 4.9 se aprecian los valores de las temperaturas registradas cada 2 horas en el sistema de destilación solar. En los tres días se observa la presencia de condensado a las 10:00 am. Al inicio de la presencia de condensado, el agua en la charola alcanzó una temperatura entre 45.9°C y 71.9, siendo las 2:00 pm del 14 de agosto cuando se registró el dato más elevado, mientras que en el evaporador se registró la temperatura más alta de 68.4°C y la menor de 26.3 °C. Como en el caso anterior, las medidas dejaron de realizarse a las 6:00 pm.

En la Figura 4.11 se muestra la relación de la temperatura interna del destilador con la temperatura registrada en el exterior. En ambos casos la temperaturas más elevada a las 2:00 pm. A pesar de que en el exterior se reporta un valor de 33°C, el agua alcanzó los 71.9°C, mientras que el vapor alcanzó 68.4°C.

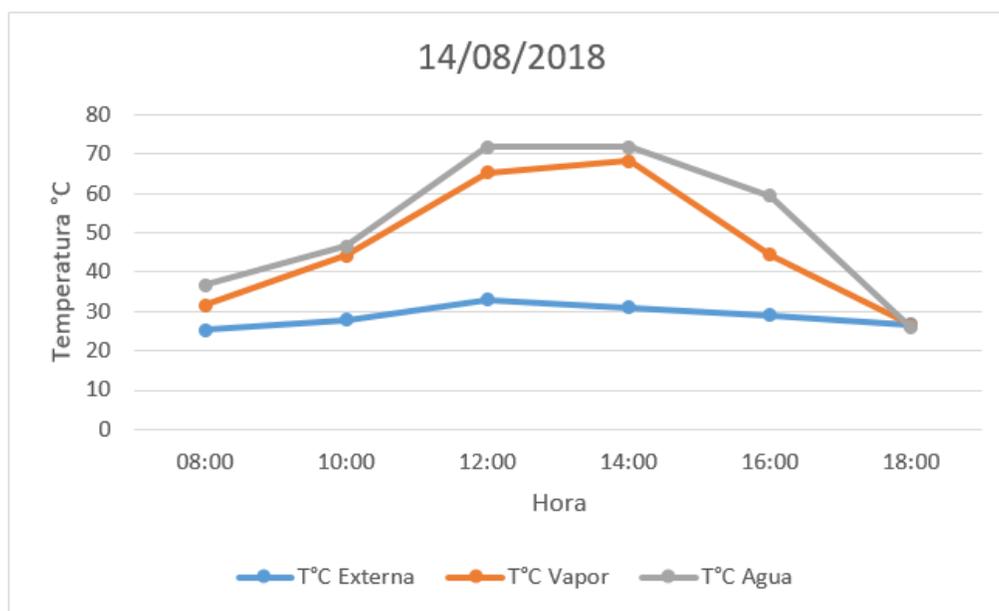


Figura 4.11. Variación de temperatura en el destilador el día 14/08/2018.

### 4.2.3 ANÁLISIS DEL DESTILADO LA ESPERANZA

En la última fase del experimento se destiló agua del pozo La Esperanza. En este caso se colectaron 4 muestras, cuyos resultados se analizarán a continuación. El código de identificación de las muestras se encuentra en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Tabla de identificación de las muestras La Esperanza

LA ESPERANZA	
Fecha	ID
07-ago	Pozo
25-ago	D-1
26-ago	D-2
28-ago	D-3
29-ago	D-4

Al igual que en los casos anteriores, los primeros resultados registrados son los correspondientes a SDT y CE. En la Figura 4.12, se muestran los resultados de CE medidos en cada una de las muestras.



Figura 4.12. Datos de CE medidos a las muestras La Esperanza.

En el caso de los destilados La Esperanza, se puede observar como en D-1 la CE se encontró más alta que en las demás muestras, teniendo un valor de 36.9 mg/l. Esto atribuido, a que se trata de la primera muestra obtenida, después de que el sistema permaneció 5 días sin destilar.

La eficiencia de remoción de salinidad con respecto a los parámetros de CE y SDT es de 98.53%. Los resultados de arsénico y flúor se muestran en las Figuras 4.13 y 4.14 respectivamente. En el caso del arsénico se puede observar que el contenido de este parámetro en la muestra de pozo es de 0.136 mg/l, por lo que sobrepasa el límite permitido establecido en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 de 0.025 mg/l. El porcentaje de remoción de este elemento es del 100%, ya que en las muestras de destilado este parámetro no fue detectado. Para flúor la muestra de pozo registro 4.49 mg/l, que al igual que en el caso del As sobrepasa el límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994, que es de 1.5 mg/l. El porcentaje de remoción en función a este parámetro es de 96.44%.

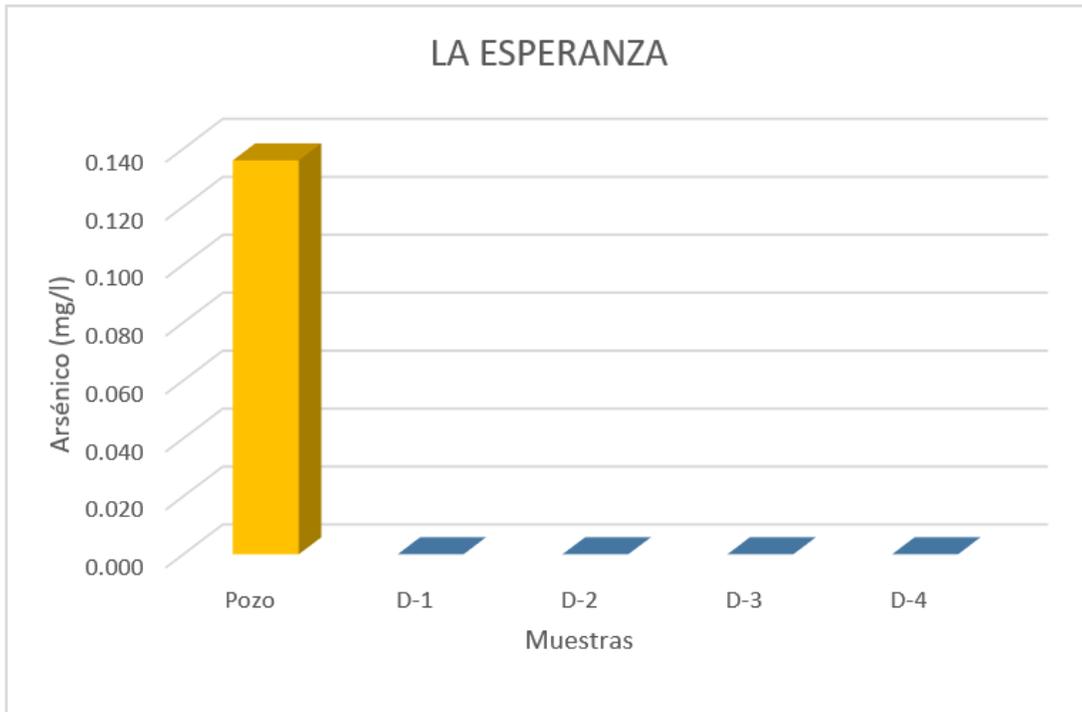


Figura 4.13. Concentraciones de arsénico en las muestras La Esperanza.



Figura 4.14. Concentraciones de flúor en las muestras La Esperanza.

Al igual que para las muestras La Regina y San José, se registraron los datos climatológicos durante la duración de esta etapa del experimento. Los resultados son reportados en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Valores de parámetros climatológicos durante la destilación de agua del pozo La Esperanza

Fecha	25/08/2018	26/08/2018	28/08/2018	29/08/2018
Temperatura máxima (°C)	34	33	31	34
Temperatura mínima (°C)	23	22	22	21
Viento medio (km/hr)	7	6	8	7
Dirección del viento	Noreste	Noreste	Noreste	Noreste
humedad (%)	38	32	34	29
nubosidad (%)	17	9	15	7
Precipitación (mm)	0	0	0	0

Como se puede observar, se presentaron temperaturas máximas diarias entre 31°C y 34°C, mientras que las mínimas oscilaron entre 21°C y 23°C. En los demás parámetros también se puede observar que la variación no fueron considerables.

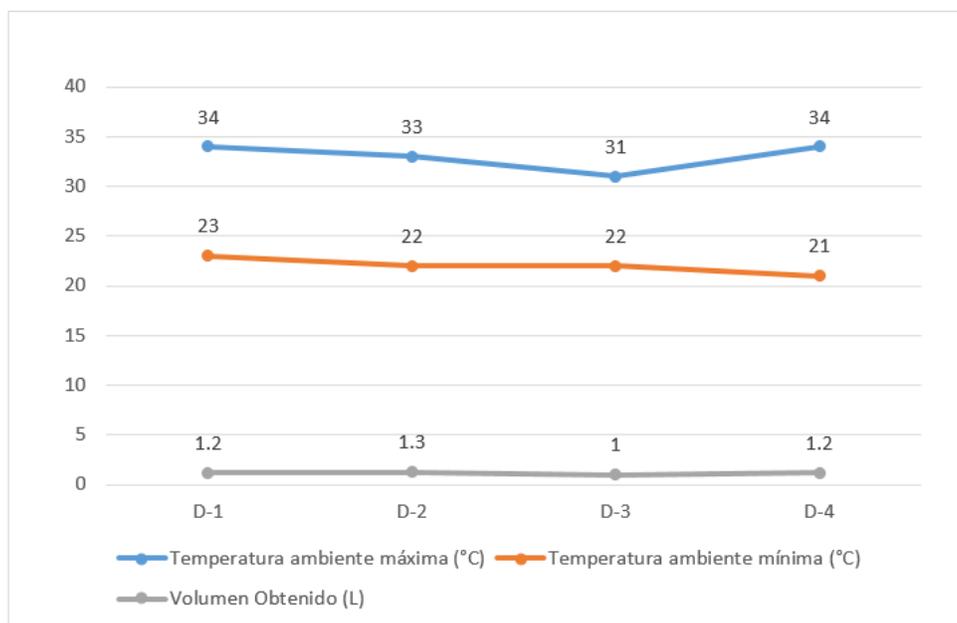


Figura 4.15. Variaciones diarias del volumen de destilado La Esperanza obtenido con relación a las temperaturas máximas y mínimas del ambiente.

En la Figura 4.15 se observa la relación entre la temperatura ambiental máxima y mínima registrada diariamente y el volumen de destilado obtenido. En este caso se puede corroborar lo que ya se había visto con anterioridad en relación a estos dos factores, y es que el volumen obtenido, está relacionado directamente con la temperatura, sobre todo con la temperatura máxima.

La temperatura máxima, en este caso, es la que tiene relación con el volumen obtenido. Como se comentó antes, el rango de temperatura es de 31°C a 34°C. El menor volumen lo presenta D-3, que es cuando se registra la temperatura de 31°C.

Tabla 4.12. Temperaturas medidas en el destilador para La Esperanza.

Fecha	Hora	T°C Externa	T°C Vapor	T°C Agua	Condensado	Destilado
25/08/2018	08:00	25.6	36.5	35.8	NO	NO
	10:00	28.5	50.9	57.2	SI	NO
	12:00	32	61.8	69.2	SI	SI
	14:00	32.9	65	68.2	SI	SI
	16:00	31.6	36.5	40.5	SI	SI
	18:00	30.1	29	28.4	NO	NO
26/08/2018	08:00	24.9	33.7	37.1	NO	NO
	10:00	27	43.4	51.3	NO	NO
	12:00	32.2	64	70.4	SI	SI
	14:00	34.4	67.4	74.2	SI	SI
	16:00	32.7	35.9	42	SI	SI
	18:00	31.6	32.8	36.4	NO	NO
28/08/2018	08:00	26.4	36.3	43.3	NO	NO
	10:00	30	52.2	56.9	SI	NO
	12:00	31.7	52	61.2	SI	SI
	14:00	32.5	50.1	55.2	SI	SI
	16:00	31	36.2	41.1	SI	SI
	18:00	24.5	25.5	29	NO	NO
29/08/2018	08:00	25.3	33.2	32.4	NO	NO
	10:00	29	52.1	58.7	SI	NO
	12:00	31.9	53	68.5	SI	SI
	14:00	33.6	53.7	68.9	SI	SI
	16:00	31.2	34	39.6	SI	SI
	18:00	23.3	31.2	35.2	NO	NO

En la Tabla 4.12 se registran los valores obtenidos de las mediciones realizadas cada dos horas en el sistema de destilación solar. En tres de los cuatro días el condensado se

comenzó a formar a las 10:00 am, con una temperatura exterior mayor a los 28°C. La temperatura más alta se registró a las 2:00 pm en los 4 casos, siendo mayor de 32°C.

El día 26 de agosto, el vapor alcanzó la temperatura más alta, siendo de 67.4°C, mientras que el agua alcanzó los 74.2 °C. Al igual que en los casos anteriores, la última medición se realizó a las 6:00 pm. En la Figura 4.16 se muestra gráficamente la relación entre las temperaturas registradas.

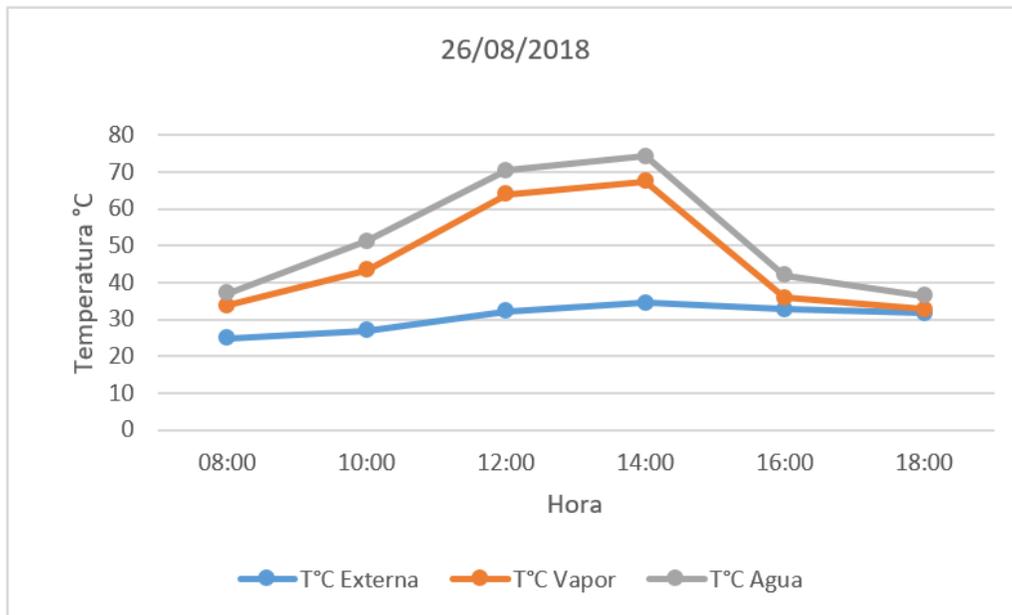


Figura 4.16. Variación de temperatura en el destilador el día 26/08/2018.

#### 4.2.4 RESUMEN DE RESULTADOS

En la Tabla 4.13 se presenta la información obtenida en la Etapa II del estudio en relación a la calidad del agua en las diferentes muestras analizadas. Esta información está conformada por 18 muestras, entre las que se encuentran una muestra de la planta de ósmosis ubicada en la localidad San José, 3 muestras de pozos ubicados en las localidades de San José, La Esperanza y La Regina del municipio de Julimes, una muestra de residuo del destilado San José y 13 muestras de destilado obtenido con la alimentación del destilador con agua de los 3 pozos mencionados.

Tabla 4.13. Resultados del análisis de las muestras de la Etapa II: Operación del sistema con agua de Julimes.

MUESTRA	FECHA	CE	SDT	As	F	Cl	SO4	NO3
Pozo San José	07-ago	2140	1497	0.194	7.42	172.74	589.12	30.72
Dest. San José- 1	16-ago	21.2	14.8	0.001	0.12			
Dest. San José- 2	17-ago	8.89	6.2	<0.001	0.06			
Dest. San José- 3	18-ago	19.46	13.6	<0.001	0.21			
Dest. San José- 4	19-ago	15.81	11.1	<0.001	0.21	ND	ND	ND
Dest. San José- 5	09-sep	17.07	12	<0.001	0.14			
Dest. San José- 6	10-sep	18.11	12.7	<0.001	0.06			
<b>PROMEDIO DESTILADO</b>		<b>16.76</b>	<b>11.7</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.13</b>			
Planta Ósmosis Inv. San José	07-ago	41.9	29.3	0.003	0.27			
Residuo Destilado San José	19-ago	8354	5851	1.174	-	-	-	-
Pozo La Regina	07-ago	2570	1801	0.145	5.26	210.96	734.04	23.93
Dest. La Regina - 1	09-ago	27.4	19.2	0.001	0.21			
Dest. La Regina - 2	13-ago	18.26	12.8	<0.001	0.09			
Dest. La Regina - 3	14-ago	17.88	12.5	<0.001	0.23	ND	ND	ND
<b>PROMEDIO DESTILADO</b>		<b>21.18</b>	<b>14.8</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.18</b>			
Pozo La Esperanza	07-ago	1630	1141	0.136	4.49	111.38	538.76	11.65
Dest. Esperanza - 1	25-ago	36.9	25.8	<0.001	0.18			
Dest. Esperanza - 2	26-ago	22.7	15.9	<0.001	0.15			
Dest. Esperanza - 3	28-ago	16.89	11.8	<0.001	0.17			
Dest. Esperanza - 4	29-ago	19.15	13.4	<0.001	0.14	ND	ND	ND
<b>PROMEDIO DESTILADO</b>		<b>23.91</b>	<b>16.725</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.16</b>			

Al comparar los resultados de los distintos parámetros medidos en las muestras de pozo con los registrados en las muestras de destilado se puede ver claramente la mejora significativa en la calidad del agua. Los porcentajes de remoción de salinidad para arsénico varían entre el 99% y 100%; para flúor oscilan entre el 96% y el 98% y en función de CE y SDT están entre 98% y 99%.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

- El sistema removió la salinidad en función de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en más del 98%.
- La destilación solar mejoró la calidad del agua subterránea con altas concentraciones de arsénico y flúor, removiendo más del 99% el arsénico, mientras que el flúor se redujo más del 96%.
- El sistema de destilación solar cumple con las características para ser implementado en lugares de difícil acceso, donde la calidad del agua subterránea no es ideal para consumo humano y no es viable instalar plantas de osmosis inversa.
- El agua desalinizada mediante destilación solar puede ser mezclada con agua subterránea con altas concentraciones de arsénico y flúor para así obtener agua apta para consumo humano.

### **5.2. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar trabajos probando con agua que contenga mayor cantidad de sales.
- Operar el sistema en otras estaciones del año, para así probar su eficiencia en distintas condiciones climáticas.
- Se recomienda hacer mejoras en el sistema tales como cambiar el material de la puerta, ya que la madera sufre alteraciones con la humedad si no se tiene el cuidado debido. También es recomendable cambiar el material de los canales, el cual es PVC, por uno que sea más resistente a las altas temperaturas.
- Se sugiere establecer un procedimiento de limpieza a la charola del equipo que evite la exposición de los demás componentes internos a contaminantes presentes en el aire.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, R. M. (2009). El agua, recurso estratégico del siglo XXI. Facultad Nacional de Salud Pública, 23(1).
- Barrera, Y. (2008). "Estudio hidrogeoquímico y de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Meoqui- Delicias". Tesis, Facultad de Ingeniería, UACH.
- Bermúdez, A. and Thomson, M. (2008). Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, México. Journal for Desalination. Vol. 220, pp. 431-440.
- Bocanegra, O. C., Bocanegra, E. M., & Alvarez, A. A. (2002). Arsénico en las aguas subterráneas: su impacto en la salud. In Proceedings of the Congreso Internacional XXXII IAH y VI ALHSUD, Aguas Subterráneas y Desarrollo Humano (Vol. 21, pp. 21-2).
- Carabantes, A. G., & de Fernicola, N. A. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. Revista brasileira de ciências farmacêuticas, 39(4), 365-372.
- Castro de Esparza, M. L. (2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. In International Congress Natural Arsenic in Groundwater in Latin America.
- Castro de Esparza, M. L. (2004). Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos. In International Congress Natural Arsenic in groundwaters of Latin America
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Meoqui- Delicias (0831) Estado de Chihuahua.
- CONAGUA. (2011). Agua en el mundo. 115.
- CONAGUA. (2018). Usos del agua.
- Dagda, A. (2017). "Desarrollo de un sistema piloto de destilación solar para mejorar la calidad del efluente de una planta de tratamiento secundario". Tesis, Facultad de Ingeniería, UACH.

- DOF (2018). Diario Oficial de la Federación. Acuerdo por el cual se actualiza la disponibilidad de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. 04 de enero de 2018.
- Duffie, J. y Beckman, W. 1974. Solar Energy Thermal Processes, Primera edición New York.
- Esteban, C., J. Franco, and A. Fasulo. (2000). "Destilador solar asistido con colector solar acumulador." Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 4: 39-41.
- Fetter, C. W. (2001). Applied hydrogeology. Waveland Press.
- Freeze, R.A. y J.A. Cherry (1979). Groundwater. Prentice-Hall.
- García, P. A. (Ed.). (2002). Agua, cultura y sociedad en México. El Colegio de Michoacán AC.
- GWP (2012). Aguas subterráneas y agricultura de regadío: haciendo una relación beneficiosa más sostenible. Global Water Partnership.
- JCAS, Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua (2011). Archivo del Departamento de Calidad del Agua.
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. Gaceta Ecológica, (64), 9-18.
- Johnston, R.; Heinjnen, H.; Wurzel, P. (2001). Arsenic in Drinking Water, Cap. 6: Safe Water Technology, OMS, Final Draft.

### **PÁGINAS WEB CONSULTADAS**

- Arsénico (Organización Mundial de la Salud)

U. R. L. <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

- Características del agua potable

U. R. L.

[https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing\\_sanitaria/Ingenieria\\_Sanitaria\\_A4\\_Capitulo\\_03\\_Caracteristicas\\_del\\_Agua\\_Potable.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_03_Caracteristicas_del_Agua_Potable.pdf)

- Destilador solar

U.R.L. [https://www.ecured.cu/Destilador\\_solar](https://www.ecured.cu/Destilador_solar)

- Distribución de agua en el planeta

U. R. L. <http://jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta/>

- El arsénico y el agua de consumo

U. R. L. [http://www.avila-rural.com/wp-content/uploads/2015/12/Arsenico\\_Agua\\_Consumo\\_Humano.pdf](http://www.avila-rural.com/wp-content/uploads/2015/12/Arsenico_Agua_Consumo_Humano.pdf)

- Estándares de agua potable

U. R. L.

[https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87331/pdf\\_2163.pdf?sequence=1](https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87331/pdf_2163.pdf?sequence=1)

- La composición química de las aguas subterráneas naturales

U. R. L. [http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1\\_1.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf)

- Los destiladores solares

U. R. L. <http://www.sitiosolar.com/los-destiladores-solares/>

- Normatividad para agua potable en México: De la gestión a la aplicación

U. R. L. <https://www.iagua.es/blogs/luis-anda-valades/normatividad-aplicable-agua-potable-mexico-gestion-aplicacion>

- Osmosis inversa

U. R. L. <https://www.textoscientificos.com/quimica/osmosis/inversa>

- ¿Qué es agua subterránea?

U. R. L. <https://www.un-igrac.org/es/qu%C3%A9-es-agua-subterr%C3%A1nea>

- Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México

U. R. L. <http://defiendelasierra.org/wp-content/uploads/Ars%C3%A9nico-en-M%C3%A9xico.pdf>

- Usos del agua

U. R. L. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>