

# **UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



*Una Institución Adventista*

**Purificación de agua subterránea con arsénico mediante  
destilación solar para uso industrial en condiciones  
altiplánicas, Juliaca, Perú**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Noeli Maribel Coarite Quispe

Jhon Frank Masco Choque

Asesor:

Ing. Miguel Ángel Salcedo Enríquez

**Juliaca, julio de 2022**

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Miguel Ángel Salcedo Enríquez, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

### DECLARO:

Que el presente trabajo de investigación titulado: **“PURIFICACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA CON ARSÉNICO MEDIANTE DESTILACIÓN SOLAR PARA USO INDUSTRIAL EN CONDICIONES ALTIPLÁNICAS, JULIACA, PERÚ”** constituye la memoria que presentan los bachilleres **Noeli Maribel Coarite Quispe** y **Jhon Frank Masco Choque** para obtener el título de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizado en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 19 días del mes de julio del año 2022.



---

Ing. Miguel Ángel Salcedo Enríquez Asesor



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 05 día(s) del mes de Julio del año 2023, siendo las 11:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Enrique Mamani Luila, el secretario: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera y los demás miembros: Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani y el asesor: Ing. Miguel Ángel Salcedo Enríquez

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Purificación de agua subterránea con arsénico mediante destilación solar para uso industrial en condiciones altiplánicas, Juliaca, Perú

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Noeli Maribel Lozarite Quipe  
 b) Ihon Frank Masco Choque

conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental  
 (Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)/las candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Noeli Maribel Lozarite Quipe

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

Candidato (b): Ihon Frank Masco Choque

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)/las candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]  
Presidente

[Firma]  
Secretario

[Firma]  
Asesor

[Firma]  
Miembro

[Firma]  
Candidato/a (a)

[Firma]  
Miembro  
Candidato/a (b)

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios porque fue nuestro soporte y apoyo principal, como también a la universidad, por habernos formado como personas y hoy en día como profesionales, de igual forma a los ingenieros que siempre tuvieron la disposición de ayudarnos ya sea de manera directa o indirecta y finalmente a nuestros padres que fueron nuestros mayores promotores durante este proceso.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
ABSTRACT:.....	9
1 INTRODUCCIÓN .....	10
2 METODOLOGÍA .....	12
2.1. Recolección de muestras.....	12
2.2. Diseño del destilador solar.....	12
2.3. Procedimiento Experimental.....	13
2.4. Análisis estadístico y modelamiento lineal.....	14
2.4.1. Modelos de regresión.....	14
3 RESULTADOS.....	15
3.1. Remoción de arsénico y parámetros físicos del agua subterránea tratada.....	15
3.2. Monitoreo de Humedad y temperatura .....	16
3.3. Monitoreo de Volumen y tiempo.....	18
3.4. Eficiencia de volumen de agua entrante y saliente .....	19
4 DISCUSIÓN .....	20
4.1. Concentración de arsénico antes y después del tratamiento .....	20
4.2. Caracterización de los parámetros con pre y post prueba.....	20
4.3. Determinación de la eficiencia del destilador .....	21
5 CONCLUSIONES .....	21
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Categorización de activos.....	15
Tabla 2 Análisis estadístico de la humedad, Juliaca, Puno (Perú). ....	17
Tabla 3 Análisis estadístico descriptivo de la temperatura, Juliaca, Puno (Perú). ....	18
Tabla 4 Análisis estadístico de los coeficientes de modelos, Juliaca, Puno (Perú).....	19
Tabla 5 Determinación de la eficiencia del destilador, Juliaca, Puno (Perú) .....	19

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del punto de muestreo de agua subterránea, Juliaca, Puno (Perú).....	12
Figura 2 Diseño del equipo de destilación solar con placa Arduino, Juliaca, Puno (Perú) .....	13
Figura 3 Grafico de barras del contenido de arsénico de la muestra inicial (Mo), muestra final (Mf) frente a los Estándares de Calidad de Agua (ECA), Juliaca, Puno (Perú) .....	15
Figura 4 Grafico de cajas y bigotes de monitoreo de humedad obtenidos del equipo de destilación, Juliaca, Puno (Perú).....	16
Figura 5 Gráficos de cajas y bigotes de monitoreo de temperatura obtenido del equipo de destilación, Juliaca, Puno (Perú).....	17
Figura 6 Regresión lineal del volumen de agua con respecto al tiempo, Juliaca, Puno (Perú) .....	18

## **Purificación de agua subterránea con arsénico mediante destilación solar para uso industrial en condiciones altiplánicas, Juliaca, Perú**

### **RESUMEN:**

En la actualidad las tecnologías limpias para el tratamiento de aguas cada vez adquieren mayor relevancia, entre los cuales se destaca la destilación solar por ser un método un procedimiento sencillo y económico, por este motivo el objetivo de esta investigación fue evaluar la purificación de aguas subterráneas mediante destilación solar a condiciones altiplánicas, para tal efecto se utilizó un sistema de destilación solar (DS) de una sola pendiente, equipado con una plataforma electrónica (Arduino), sensores Digitales de Temperatura y Humedad (DTH) 11 y 22, asimismo, esta fue alimentada con 2,5 L de agua subterránea a una concentración de 0,093 mg/L de arsénico (As), asimismo, se realizó una caracterización y monitoreo de: conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), pH, humedad, temperatura y As, de tal forma que con los datos obtenidos se realizó una comparación pre y post test a un nivel de significancia  $p < 0,05$ . Los resultados mostraron reducciones significativas de cada uno de los parámetros, entre los cuales se destaca la disminución de As con un valor inferior a 0,005 mg/L. En conclusión, la destilación solar es un método con alto rendimiento en el tratamiento de agua subterránea contaminada con arsénico y por ende una buena propuesta de aplicación tecnológica.

**Palabras clave:** Agua subterránea, arsénico, destilación solar, destilador solar.

## **Purification of groundwater with arsenic by solar distillation for industrial use in highland conditions**

### **ABSTRACT:**

At present, clean technologies for water treatment are becoming more relevant, among which solar distillation stands out as a simple and economical method, for this reason the objective of this research was to evaluate the purification of groundwater by solar distillation at altiplano conditions, for this purpose a single slope solar distillation system (DS) was used, equipped with an electronic platform (Arduino), Digital Temperature and Humidity sensors (DTH) 11 and 22, likewise, this was fed with 2.5 L of groundwater at a concentration of 0.093 mg/L of arsenic (As), likewise, a characterization and monitoring of: electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), pH, humidity, temperature and As, in such a way that a pre- and post-test comparison was made with the data obtained at a level of significance  $p < 0.05$ . The results showed significant reductions in each of the parameters, among which the decrease in As stands out with a value lower than 0.005 mg/L. In conclusion, solar distillation is a method with high performance in the treatment of groundwater contaminated with arsenic and therefore a good proposal for technological application.

Keywords: underground water; arsenic; solar distillation; solar still.

# 1 INTRODUCCIÓN

En el mundo, más de 1 100 millones de personas carecen de agua potable, de los cuales 31 países padecen escases de esta y solo 2 de cada 5 personas no gozan con los servicios básicos de saneamiento (Sahui, 2012). En el 2016, el Perú presentó, que el 16,3 % de su población no cuenta con acceso a una red pública de agua, y el 32,9 % tiene acceso de agua potable, de los cuales el 19,0 % pertenecen a la población que tiene agua de una red pública en su hogar y el 13,9 % a personas que utilizan agua de otras fuentes como: manantiales, ríos, pozos, lluvias, camiones cisterna o pilas de uso público, siendo su fuente principal en zonas áridas (Flores, 2017).

Las aguas subterráneas constituyen la fuente principal de suministro de aguas a nivel mundial, estos recursos varían de acuerdo al tipo de ambiente hidrogeológico. Algunas de estas, cuando se hallan en grandes sumas, pueden causar daños en la salud, puesto que se hallan componentes como el selenio, el arsénico, fenoles, cianuros, mercurio, plomo, nitratos, entre otros (SUNASS, 2015). El arsénico se muestra de forma natural en las aguas subterráneas provenientes principalmente de las deposiciones atmosféricas, erosiones de rocas y disolución de minerales, por consiguiente, la exposición a estos componentes trae como resultado efectos adversos a la salud, como las alteraciones dermatológicas, cáncer de piel, cáncer de vejiga, riñón, hígado, pulmón y enfermedades neurológicas (Bocanegra, et al., 2002).

En Juliaca (Puno) las altas concentraciones de As se muestran en diferentes lugares. Mamani (2019), afirma que, el As supera los 0,0735 mg/L la cual se encuentra por encima del límite máximo permisible de 0,01 mg/L en sus aguas subterráneas, valor predeterminado por la directriz de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Del mismo modo, Chambilla (2016) realizó una secuencia de 15 muestreos en 2 pozos de agua, donde excedió el límite de la norma peruana con 0,30 mg/L.

Sepúlveda (2009) refiere que estas aguas subterráneas pueden ser la causa principal de líneas de exposición al arsénico (As), con consecuencias graves y efectos secundarios a la salud, por lo que se procura un proceso de eliminación que sea efectivo, económico, de fácil operación y adaptarse a las condiciones ambientales (Castillo, 2013).

Los investigadores han desarrollado diversos métodos para reducir o eliminar la presencia de arsénico, como la coagulación-floculación, oxidación – reducción, ablandamiento de cal, estos son los métodos más usados, sin embargo, existen métodos que no son utilizados

frecuentemente, tal es el caso del método de destilación solar (Hermosillo, 1989). La destilación es un proceso, que se da mediante la aplicación de la radiación solar, donde se puede separar la mezcla líquida de las diferentes sustancias. Este método elimina residuos de hongos, sales, virus, bacterias y otros contaminantes (Fonseca, et al., 2009).

Espino, et al. (2019), realizó una investigación en la localidad del municipio de Julimes sobre la eficiencia de un sistema de destilador solar para aguas con contenido de arsénico, la cual sostiene que esta es capaz de remover más del 99 % de arsénico, el 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). En dicha investigación se concluye que, al utilizar un sistema de destilación solar, se espera eliminar la concentración de arsénico para mejorar la condición del agua, asimismo, Mohsenzadeh, et al. (2022) en su estudio de un destilador solar en el tratamiento de agua de mar encontró que este sistema posee una eficiencia hasta en un 35,6 % en estación de verano, por otro lado, Santos, et al. (2017) afirma que las condiciones medioambientales son importantes para el desempeño de un destilador solar ya que la radiación solar juega un papel importante en la temperatura interna del equipo. Por consiguiente, por lo antes expuesto y por las condiciones medioambientales altiplánicas con altas tasas de radiación en el departamento de Puno (Saravia, 2015).

El objetivo de la presente investigación es la de evaluar la purificación de agua subterránea con arsénico mediante destilación solar para uso industrial en condiciones altiplánicas.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1. Recolección de muestras

Se recolectaron 2 muestras de pozos tubulares de la ciudad de Juliaca, departamento Puno de la República del Perú (Figura 1). La muestra se colocó en botellas estériles de 1 L debidamente rotulados, para luego ser transportadas a una temperatura de 4°C a las instalaciones del laboratorio BHIOS en la ciudad de Arequipa, de la República de Perú para el análisis del contenido de arsénico.

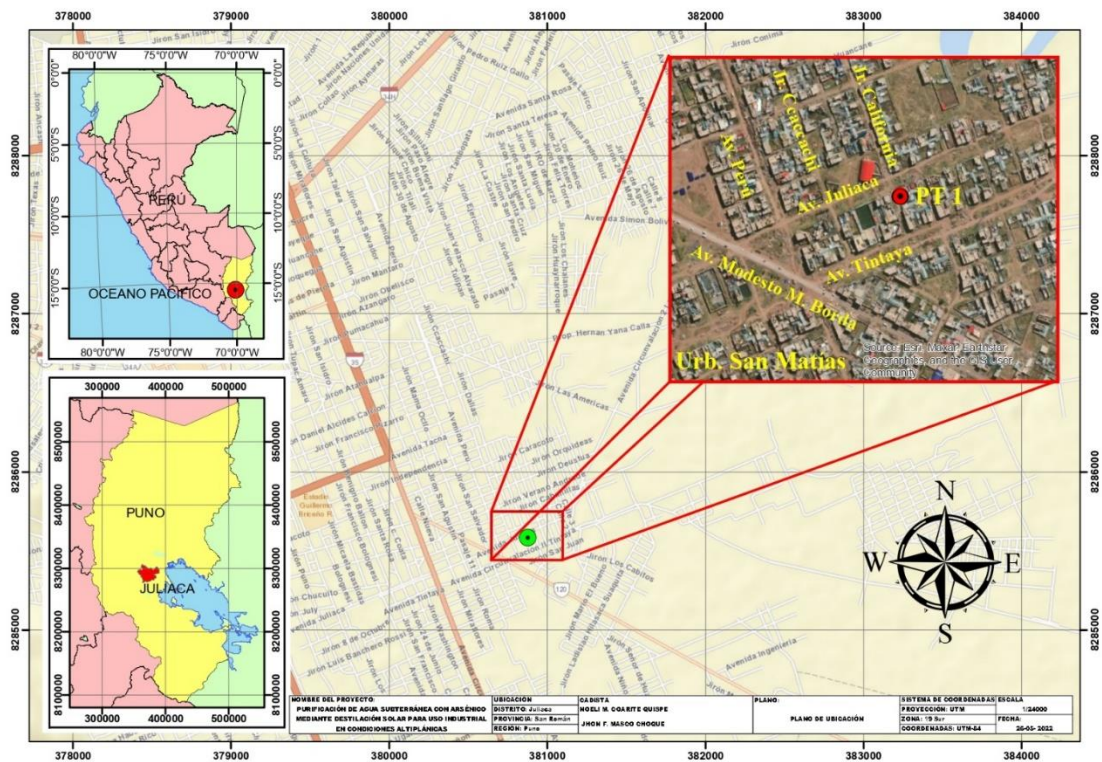


Figura 1. Ubicación del punto de muestreo de agua subterránea, Juliaca, Puno (Perú).

### 2.2. Diseño del destilador solar

El destilador solar fue elaborado a partir de fibra de vidrio con un espesor de 3 mm, con un área de 60 x 70 cm, esta consta con una bandeja de acero inoxidable color negro de 40 x 54 cm que contiene agua a destilar, este sistema cuenta con dos paredes donde la parte posterior es de 40 cm de altura y la parte anterior de 18 cm, dando una inclinación de 20 grados que facilitó el desplazamiento del fluido por la superficie interna hasta los depósitos recolectores las cuales fueron elaboradas del mismo material y ubicadas en 3 partes del sistema, así mismo la parte inferior del destilador es vidrio reflejante. Tiene un orificio en la parte superior lateral izquierda para la entrada de agua subterránea y otra en la parte inferior lateral derecho para la salida del agua destilada, dicho fluido fue almacenado en un recipiente de vidrio de 600 mL. Adicional al diseño se agregó un sistema de monitoreo arduino para

medir los niveles de temperatura y humedad dentro y fuera del destilador, con el apoyo de dos sensores de temperatura DHT 11 - DHT 22, correspondientes a un periodo diario de diez horas en el horario de 7:00 am. a 5:00 pm. (Figura 2).

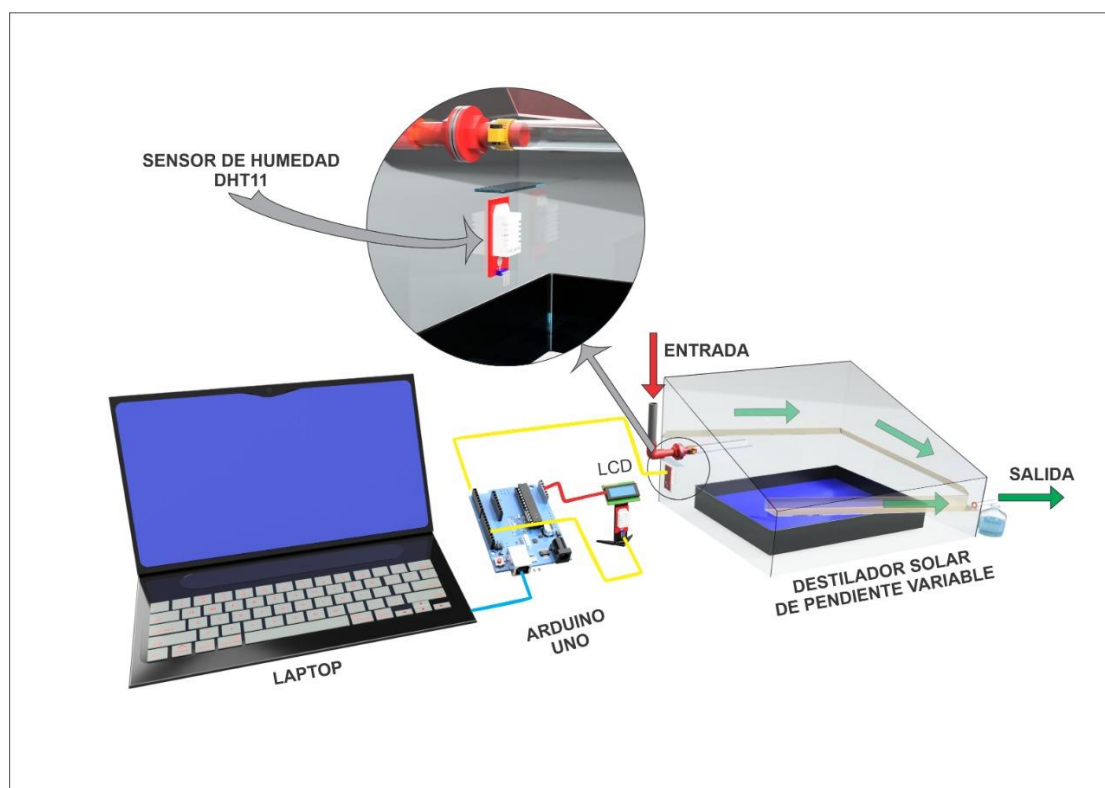


Figura 2. Diseño del equipo de destilación solar con placa Arduino, Juliaca, Puno (Perú).

### 2.3. Procedimiento Experimental

Este destilador fue alimentado diariamente con 2,5 litros de agua subterránea en una bandeja negra de acero inoxidable, ubicado en la base del sistema, este proceso se realizó por la mañana antes de que el sol entre en contacto con el destilador.

El nivel de agua que se depositó en la bandeja fue de 2,5 cm de altura, para que las altas temperaturas beneficien el proceso de evaporación al aumentar exponencialmente la presión de vapor del agua, así como lo recomienda Hermosillo (1989).

La recolección de agua tratada se realizó al final del día, con el propósito de obtener la mayor cantidad de agua destilada, se utilizó una bureta milimetrada de 25 mL, donde fue monitoreada cada 20 minutos por 10 horas en un periodo de 5 días, posteriormente se analizaron los siguientes parámetros: conductividad eléctrica (CE), pH, temperatura y oxígeno disuelto (OD); el resto del agua destilada se almaceno en un refrigerador para el posterior análisis de arsénico.

## 2.4. Análisis estadístico y modelamiento lineal

El análisis estadístico se realizó en el software RStudio versión 4.1.1 para tal efecto se realizaron pruebas de medias con las variables de respuesta (contenido de arsénico, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica), por otro lado, se realizó un modelamiento lineal simple de las cuales se realizaron comparaciones con las ecuaciones de regresión lineal simple (ecuación 1) y cuadrática (ecuación 2), también se determinó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el coeficiente ajustado ( $R^2$  – ajustado) , el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiano (BIC) con la finalidad de determinar el modelo de mejor ajuste (Chambi y Torres, 2021).

### 2.4.1. Modelos de regresión

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $y$ ; es la variable dependiente,  $X$ ; es la variable independiente  $\beta_1$ ; la pendiente de la curva y  $\beta_0$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon \quad \text{Ecuación 2}$$

Criterios de ajuste

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$R^2_{ajust} = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1} \quad \text{Ecuación 4}$$

Criterios de información

$$AIC = \frac{(T - K)SSE}{T(T - P)} e^{2k/T} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$BIC = \frac{(T - K)SSE}{T(T - P)} T^{k/T} \quad \text{Ecuación 6}$$

### 3 RESULTADOS

#### 3.1. Remoción de arsénico y parámetros físicos del agua subterránea tratada

El análisis de arsénico, muestra que el valor (0,093 mg/L) de la muestra inicial (Mo) fue considerablemente superior a los valores establecidos por los estándares de calidad de agua (ECA) con 0,01 mg/L como límite máximo permisible, sin embargo, luego del tratamiento esta tuvo una reducción hasta 0,005 mg/L (Figura 3).

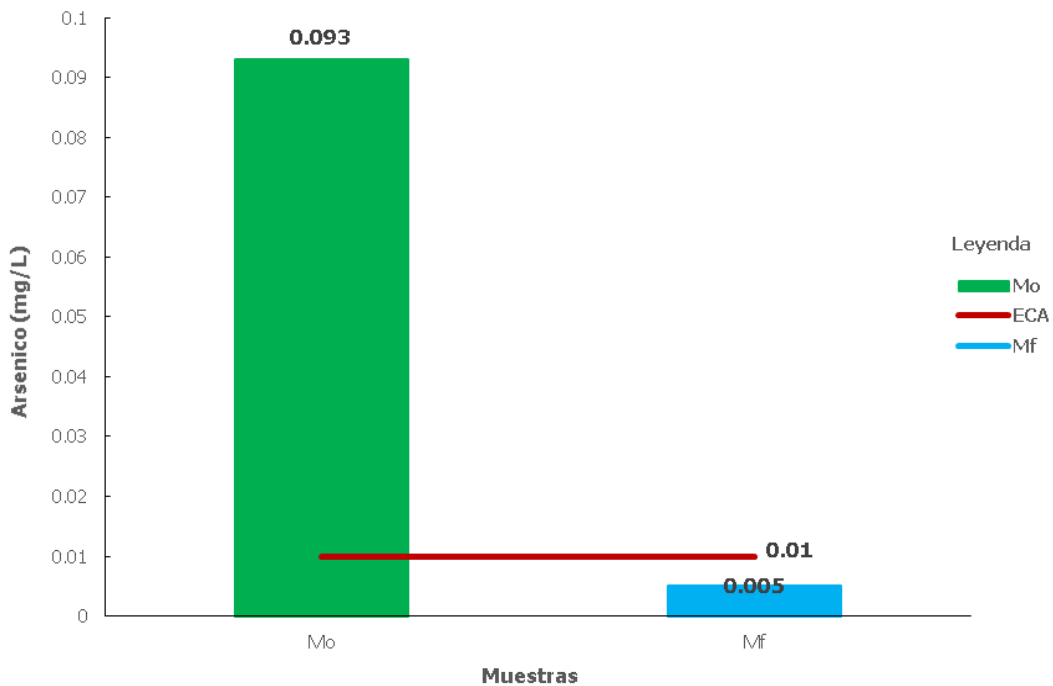


Figura 3. Gráfico de barras del contenido de arsénico de la muestra inicial (Mo), muestra final (Mf) frente a los Estándares de Calidad de Agua (ECA), Juliaca, Puno (Perú).

Con respecto a los parámetros físicos analizados, se observa, que en el pH existe diferencia de medias ya la muestra inicial es superior a la inferior, asimismo, con respecto al OD y CE, siendo la última visiblemente inferior a lo encontrado (Tabla 1).

**Tabla 1.**

*Categorización de activos.*

Muestras	Parámetros		
	pH	OD (mg/L)	Ce ( $\mu\text{S/cm}$ )
Agua subterránea ( $A_s$ )	7,89	3,96	1202
Agua destilada ( $A_d$ )	$5,60 \pm 0,94$	$5,99 \pm 0,25$	$14,82 \pm 2,94$
$\Delta \bar{x} (A_s - A_d)$	2,2875	-2,0325	1187,1775
<b>P - Valor</b>	0,016	0,005	0,000
<b>T - Student</b>	7,72	-14,06	699,41

### 3.2. Monitoreo de Humedad y temperatura

El monitoreo de humedad tanto en el interior de la caseta como en del medio ambiente, muestra que la humedad interior de la caseta fue superior a la del medio ambiente, por otro lado, el grupo de los datos de la humedad de la caseta presentó datos atípicos en contraste a la Humedad del medio ambiente, sin embargo, esta última exhibió una mayor amplitud (Figura 4).

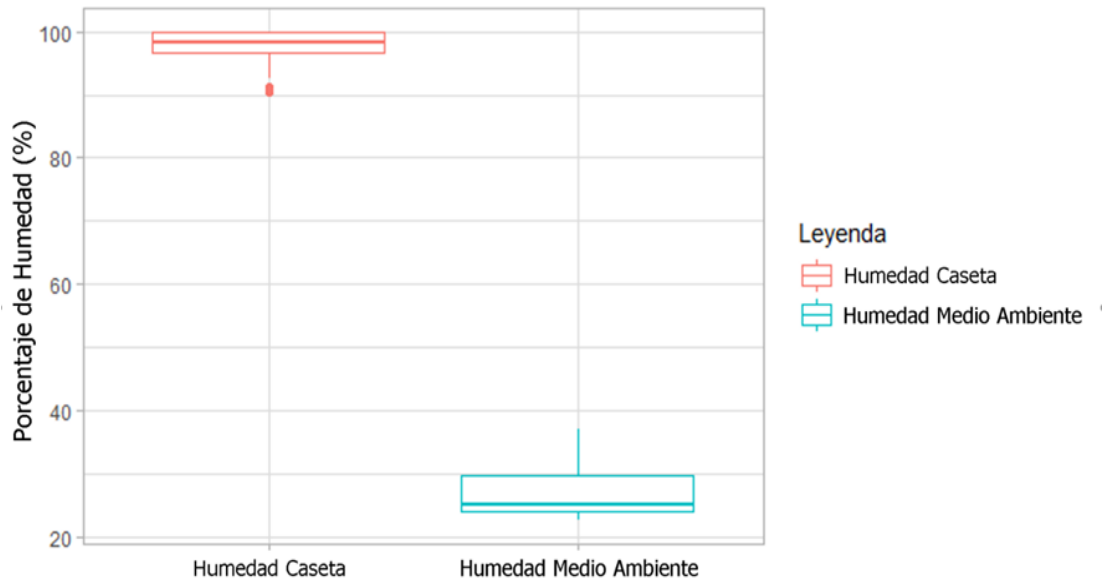


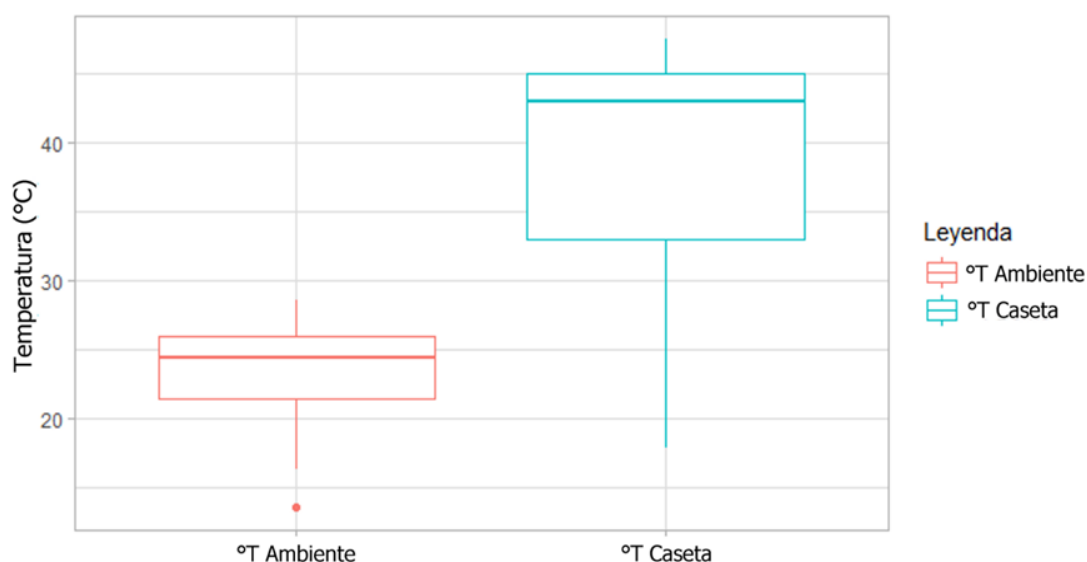
Figura 4. Gráfico de cajas y bigotes de monitoreo de humedad obtenidos del equipo de destilación, Juliaca, Puno (Perú).

Los estadísticos descriptivos del monitoreo de la humedad muestran claramente una diferencia entre la humedad de la caseta con un valor de 97,501 %, siendo esta mayor a la del medio ambiente con 26,890 %, Asimismo para ambos casos el error típico muestra valores bajos, con respecto a la moda solamente en el caso de la humedad de la caseta se muestra repeticiones siendo la más periódica la de 99,900 %, respecto a la desviación estándar la humedad de la caseta fue más reducida (Tabla 2).

**Tabla 2.***Análisis estadístico descriptivo de la humedad, Juliaca, Puno (Perú).*

<b>Descriptivo</b>	<b>Humedad Caseta</b>	<b>Humedad Medio Ambiente</b>
<b>Media</b>	97,501 (%)	26,890 (%)
<b>Error típico</b>	0,550	0,723
<b>Mediana</b>	98,180	24,980
<b>Moda</b>	99,900	--
<b>Desviación estándar</b>	2,961	3,895
<b>Varianza de la muestra</b>	8,769	15,169
<b>Curtosis</b>	0,824	0,074
<b>Coefficiente de asimetría</b>	-1,313	1,063
<b>Rango</b>	9,600	14,360
<b>Mínimo</b>	90,300	22,660
<b>Máximo</b>	99,900	37,020

Respecto al monitoreo de la temperatura tanto en el interior de la caseta como en el medio ambiente, se aprecia que la temperatura interior de la caseta fue superior a la del medio ambiente, por otro lado, el grupo de los datos de la temperatura del medio ambiente presentaron datos atípicos en contraste a la temperatura de la caseta, sin embargo, esta última presento mayor amplitud en las cajas llegando incluso a superponer datos con respecto a la temperatura medio ambiente (Figura 5).



*Figura 5.* Gráfico de cajas y bigotes de monitoreo de temperatura obtenidos del equipo de destilación, Juliaca, Puno (Perú).

Asimismo, los estadísticos descriptivos del monitoreo de la temperatura en la cual se muestra claramente una diferencia entre la temperatura de la caseta (38,62 °C) siendo esta mayor a la del medio ambiente (23,16°C), también, para ambos casos el error típico muestra valores

bajos, con respecto a la moda solamente en el caso de la temperatura de la caseta se reportó repeticiones siendo la más periódica con 47,52 °C; respecto a la desviación estándar la temperatura de la caseta fue más reducida (Tabla 3).

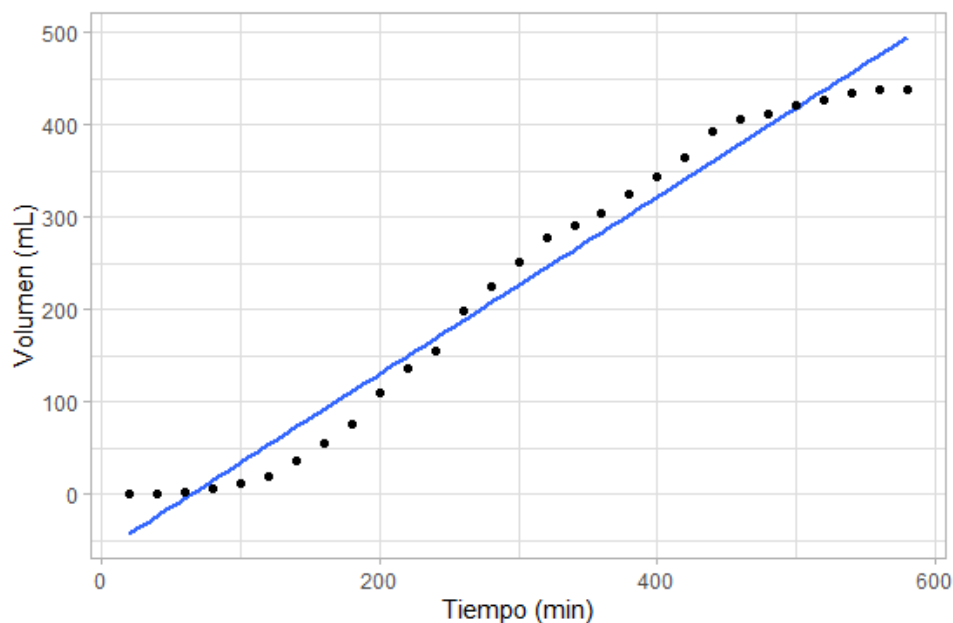
**Tabla 3.**

*Análisis estadístico descriptivo de la temperatura, Juliaca, Puno (Perú).*

<b>Descriptivo</b>	<b>°T Caseta</b>	<b>°T Medio Ambiente</b>
<b>Media</b>	38,62°C	23,16°C
<b>Error típico</b>	1,63	0,72
<b>Mediana</b>	42,94	24,44
<b>Moda</b>	42,94	16,30
<b>Desviación estándar</b>	8,77	3,89
<b>Varianza de la muestra</b>	76,87	15,11
<b>Curtosis</b>	-0,07	0,05
<b>Coefficiente de asimetría</b>	-1,08	-0,90
<b>Rango</b>	29,72	15,00
<b>Mínimo</b>	17,80°C	13,60°C
<b>Máximo</b>	47,52°C	28,60°C

### 3.3. Monitoreo de Volumen y tiempo

El comportamiento del volumen del agua destilada en función al tiempo, muestra una pendiente positiva con tendencia a incrementar, asimismo, los puntos se encuentran cercanos a la línea, es decir que a más cercano se encuentre a la línea de tendencia más relación hay entre los dos factores (Figura 6).



*Figura 6. Regresión lineal del volumen de agua con respecto al tiempo, Juliaca, Puno (Perú).*

Por otro lado, los coeficientes correspondientes a los modelos muestran que el modelo cuadrático se ajusta mejor como modelo de regresión en comparación al modelo lineal ya que el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) es ligeramente superior, sin embargo, ambos modelos presentan un buen ajuste (Tabla 4).

**Tabla 4.**

*Análisis estadístico de los coeficientes de modelos, Juliaca, Puno (Perú).*

Modelos de regresión	Coefficiente de determinación	Coefficiente ajustado	AIC	BIC
Lineal	0,972	0,971	280,625	284,726
Cuadrático	0,975	0,974	279,282	284,751

### 3.4. Eficiencia de volumen de agua entrante y saliente

Los cálculos respecto a la eficiencia en función al volumen de agua diaria, donde el volumen mínimo se obtuvo un 18 %, y el valor máximo llegó a un 33 % de eficiencia, siendo el porcentaje más alto de los 5 días donde el promedio final alcanzó un 25 % de eficiencia (Tabla 5).

**Tabla 5.**

*Determinación de la eficiencia del destilador, Juliaca, Puno (Perú).*

Tiempo (Días)	V <sub>O(L)</sub>	V <sub>f(L)</sub>	Eficiencia
1	2,5	0,44	18 %
2	2,5	0,59	24 %
3	2,5	0,82	33 %
4	2,5	0,65	26 %
5	2,5	0,60	24 %
<b>Promedio</b>	2,5	0,62	25 %

**Nota:** Vo = Volumen inicial; Vf = volumen final

## 4 DISCUSIÓN

### 4.1. Concentración de arsénico antes y después del tratamiento

En la figura 3 se aprecia las concentraciones de arsénico, donde la fuente de agua subterránea tiene un valor de 0,093 mg/L, la misma que supera el 0,01 mg/L según el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Agua dado por el Decreto Supremo N°004-2017-MINAM, sin embargo al ser tratadas estas disminuyeron a <0,005 mg/L de arsénico, estos resultados son equivalentes a no detectado, por el límite de detección del equipo utilizado por el laboratorio, así mismo, Hernández (2019) describe en su investigación que se puede obtener una remoción completa, también Chavez y Miglio (2011) en un estudio desarrollado en Apurímac en las aguas del río Iscahuacacolcabamba lograron una remoción del 88 % del arsénico bajo oxidación solar.

Benito, et al., (2010) menciona que el agua extraída de las fuentes tiene un contenido de sales disueltas que supera ampliamente el límite autorizado por la OMS para el agua potable y que al ser destiladas disminuyeron por debajo del nivel recomendado por el Código Alimentario Argentino (0,05 mg/L), y que en ambas fuentes de extracción no sobre pasa los niveles recomendados por la O.M.S. (0,01). Se puede llegar a la conclusión de que los datos del arsénico son muy inferiores a los valores recomendados por las dos autoridades reguladoras.

### 4.2. Caracterización de los parámetros con pre y post prueba

En la tabla 1 se observa la eficiencia del tratamiento con respecto al pre y post prueba. Los resultados de los análisis indican que el destilador solar tuvo una notoria eficiencia, en la que: el pH, OD y la CE manifiestan que están dentro del estándar de calidad ambiental para agua, dado por el Decreto Supremo N° 004 – 2017 – MINAM.

Al verificar los análisis de las pruebas de laboratorio realizadas al agua destilada, y compararlas con los valores establecidos por el estándar de calidad ambiental para agua (ECA), estos valores nos indica que el agua es de buena calidad apta para el consumo humano y para utilizarla en cualquier proceso industrial (MINAM, 2017).

Huezo & Moran (2012) Sostienen que el parámetro pH debe de encontrarse entre (>5 - < 8), la cual en la investigación que desarrollo tuvo como resultado un pH de 6,33 por lo que corrobora que el valor obtenido, se encuentra dentro de la norma establecida. Con respecto a la CE obtuvo un valor de 14,91  $\mu\text{S}/\text{cm}$  la cual logro reducir este parámetro de 616,42  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Jiménez (2020) menciona que la destilación solar tiene la capacidad de mejorar la calidad de agua con altos contenidos de sales que no son aptas para consumo ni para su uso industrial, donde encontró los siguientes valores; OD=9,3 mg/L, pH = 7,91, CE = 7,8  $\mu$ S/cm, la cual señala que los parámetros obtenidos se encuentran dentro de los límites máximos permisibles que detallan los entes reguladores según los parámetros analizados.

#### **4.3. Determinación de la eficiencia del destilador**

En la tabla 5 se muestra la eficiencia del destilador solar en función al volumen, según Hermsillo (1989) y Cordova, Barrios, & Cordova (2021) menciona que el promedio de un destilador solar de una sola pendiente es de un 25 %, lo cual significa que se logró alcanzar a su rendimiento establecido.

## **5 CONCLUSIONES**

Mediante el prototipo experimental del destilador solar se logró reducir la cantidad de arsénico presentes en la muestra inicial, procedente de la urbanización niño el Salvador, distrito de Juliaca, Provincia de San Román, estos valores obtenidos quedaron por debajo de los estándares de nacionales de calidad ambiental de la normativa Peruana y eso permite que ésta sea empleada para cualquier uso industrial.

En cuanto a los parámetros analizados: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, se logró disminuir después de haber pasado por el proceso de destilación.

El destilador solar obtuvo una eficiencia del 25% con respecto a la productividad de agua destilada, la cual se llegó a alcanzar el promedio de productividad para este tipo de destilador.

Este diseño de destilador solar es eficiente, de escasa inversión, sencillo de operarlo y su costo energético es baja, especialmente en zonas áridas muy aisladas del resto de las poblaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benito, A., Cantaloube, R., Fisicaro, E., Zóttola, O., Stanziola, M., Arena, A., Clement, L. (2010) Primeros resultados del diseño tecnológico y de un proceso de transferencia de destiladores solares en la provincia de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, (14). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/99580>.
- Bocanegra, O., Bocanegra, E., Alvarez, A. (2002) Arsénico en aguas subterráneas: su impacto en la salud. Aguas subterráneas y desarrollo humano = Groundwater and human development : *Mar del Plata*, (2002): 21 – 27
- Castillo, M. (2013) *Análisis teórico - experimental de un destilador solar de doble caseta con convección forzada* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de México].
- Chambi, A., Torres Jiménez, A. (2021). Modelos cinéticos sigmoidales aplicados al crecimiento de *Saccharomyces boulardii*. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 23(1), 47-54. Disponible en: <https://doi.org/10.18271/ria.2021.213>
- Chambilla, M. (2016) Extracción de arsénico por pulsos electromagnéticos en agua subterránea de Juliaca. *Revista Científica Investigación Andina*, 16(3). Disponible en: <https://www.revistas.uancv.edu.pe/index.php/RCIA/article/view/287>.
- Chávez, M., Miglio, M. (2011). Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(4), 307-314. Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810634X2011000400008&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810634X2011000400008&script=sci_arttext&tlng=pt)
- Cordova, M., Barrios, M. T., & Cordova, B. I. (2021) Modelación del sistema de destilación solar y la desalinización de agua de mar en la bahía de Paracas. *Argentina: Universidad Nacional de Córdoba-UnC*.
- Espino, M., Hernández, C., Pinales, A., Ballinas, M. (2019) Utilización de un sistema de destilación solar para remoción de Arsénico y Flúor en agua subterránea destinada al consumo humano. *Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología*, 3(8): 14 – 22.
- Flores, J. (2017) *Diseño de un sistema de agua potable en la asociación vecinal de Los Girasoles de Valdivia, distrito de Huanchaco-Trujillo* [Tesis de título, Universidad Privada de Trujillo].
- Fonseca, S., Brito, A. L., Andión, R., Perdomo, E., Fernández, M. I. (2009) *Análisis Exegético del Destilador Solar de Bandeja de Fibra de Vidrio*.
- Hermosillo, J. J. (1989) Destilador Solar En: Huella. Ed. por Bazdresch, M., Fuentes, R., Morfin F., Núñez, F. J., Romo, C., Sanchez L., Silva, J. Guadalajara: *ITESO*, 1-48
- Hernández, C. (2019) *Desalinización de agua subterránea con alto contenido de Arsénico mediante un sistema de Destilación Solar* [Tesis para Maestría, universidad Autónoma de Chihuahua].
- Huezo, F. R., Morán, J. I. (2012) *Diseño, construcción y validación de un destilador solar para uso en los laboratorios de la planta piloto de la escuela de ingeniería química* [Tesis

para Título, Universidad del Salvador].

Saravia, L. R. (2015) Energía Solar para Generación de Agua Potable En: *Concurso Nacional de Innovaciones*. Ed. por Saravia, L. R. Argentina: INNOVAR, 34-35

Jiménez, K. E. (2020) *Purificación de agua local para consumo humano con un destilador solar de alta eficiencia para entornos domésticos rurales áridos* [Tesis para Título Universidad Técnica de Cotopaxi].

Mamani, W. (2019) Contaminación de las Aguas Subterráneas por Arsénico (As) el caso del Distrito de Juliaca – Perú. *Revista de Investigación Científica ÑAWPARISUN*, (1). *Universidad Nacional de Juliaca*. Disponible en <http://repositorio.unaj.edu.pe:8080/bitstream/handle/UNAJ/59/31-36.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mohsenzadeh, M., Aye, L., & Christopher, P. (2022). Development and experimental analysis of an innovative self-cleaning low vacuum hemispherical floating solar still for low-cost desalination. *Energy Conversion and Management*, 251, 114902

Sahui, J. A. (2012) El Consumo Responsable de los Recursos Naturales como Punto de Partida para un Desarrollo Sustentable. *Revista Hitos de Ciencias Económicas Administrativas, Universidad Autónoma de Campeche*. Disponible en <http://ri.ujat.mx/bitstream/20.500.12107/1870/1/-314-242-A.pdf>

Sepúlveda, R. (2009) El arsénico de la contaminación de aguas subterráneas. *Ciencia UANL*, (3). *Universidad Autónoma de Nuevo León México*. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdtRed.jsp?iCve=40211814002>

SUNASS (2015) *Diagnostico de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en el Ámbito de Operación de las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento*. Ed. A cargo de Martha Miyashiro. Lima: Cooperación Alemana, implementada por la GIZ. Programa de Modernización y Fortalecimiento del Sector Agua y Saneamiento (PROAGUA II).

Velasquez, L. F. (2017) *Prototipo de un Sistema Automático para Purificación de Agua Utilizando Energía Solar Fotovoltaica en la Comunidad los Chilamos del Municipio de Diriamba en el Periodo de Setiembre 2016 a mayo 2017* [Tesis para Título, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua].