

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
Escuela de Posgrado

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

**DESTILADOR GEOTÉRMICO-SOLAR PARA REDUCIR
LA CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO DE AGUAS
GEOTERMALES PARA CONSUMO HUMANO
EN LA REGIÓN TACNA**

TESIS

**PRESENTADA POR:
MSc. CARLOS ARMANDO POLO BRAVO**

**Para optar el Grado Académico de:
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA
ESCUELA DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

**DESTILADOR GEOTÉRMICO-SOLAR PARA REDUCIR LA
CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO DE AGUAS GEOTERMALES PARA
CONSUMO HUMANO EN LA REGIÓN TACNA**

Tesis sustentada y aprobada el 02 de junio de 2025, estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE

: 

Dr. Julio Miguel Fernández Prado

SECRETARIO

: 

Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

MIEMBRO

: 

Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

ASESOR

: 

Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Dr. ALBERTO BACILIO QUISPE COHAILA**, en mi condición de asesor acreditado con Resolución de Escuela de Posgrado N° 8117-2019-ESPG/UNJBG del 19 de febrero de 2019, del trabajo de tesis titulado: ***“Destilador geotérmico-solar para reducir la concentración de arsénico de aguas geotermiales para consumo humano en la región Tacna”***, presentado por el MSc. Carlos Armando Polo Bravo, para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias de Ambientales.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajo de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 1%.

Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis y está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado a solicitud del interesado con fines de continuar con los trámites respectivos para la obtención del Grado Académico de Doctor en Ciencias de Ambientales.

Tacna, 06 de mayo 2025

FIRMA ASESOR
Nombres y apellidos

.....
Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila
DNI N° 00419682



FIRMA TESISISTA
Nombres y apellidos

.....
MSc. Carlos Armando Polo Bravo
DNI N° 00476069



DEDICATORIA

A mi familia por apoyarme y acompañarme en este proyecto que tanto tiempo le he dedicado

A Dios por mi existencia y experiencia de vida, por creer y confiar en él

A mi padre desde el cielo, a mi querida madre y hermanos porque siempre me inspiran con su ejemplo y consejos

A mi esposa Rosa, hijos Giancarlo, Claudia y Carlitos que me alientan a seguir adelante

A mis nietos Caetano, Leonardo y Leonela por sus encantos y ternura de vida

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por ofrecer un programa doctoral de mucha importancia para cuidar nuestro medio ambiente y la sobrevivencia humana

A los colegas del Departamento Académico de Física de la Facultad de Ciencias de la UNJBG, por su constante apoyo, impulso y colaboración

A los profesionales físicos Jhon Chuquimia López, Alessandro De La Galla Contreras, Rigoberto Bernabé Coaquera, Edgar Coaquira Miranda y Arturo Quispe Flores por sus importantes colaboraciones en la construcción y evaluación experimental

A la UNJBG, a través del Vicerrectorado de Investigación (VIIN) por el financiamiento concursable para la evaluación experimental del destilador en situ, con fondos del Canon, Sobre canon y Regalías Mineras

A la comunidad altoandina de Chillicollpa a través de sus autoridades comunales que permitieron el uso de aguas geotermales y terreno del campo geotermal Borateras, Putina Chica-Tarata, Tacna para la evaluación experimental del sistema

A mi asesor Dr. Alberto Quispe Cohaila por la concepción, orientación y apoyo

ÍNDICE GENERAL

Introducción	13
--------------	----

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1	Descripción del problema	15
	1.1.1 Antecedentes del problema	15
	1.1.2 Problemática de la investigación	19
1.2	Formulación del problema	20
	1.2.1 Problema general	20
	1.2.2 Problemas específicos	20
1.3	Justificación e importancia	20
	1.3.1 Justificación de la investigación	21
	1.3.2 Importancia del estudio	22
1.4	Alcances y limitaciones	22
	1.4.2 Alcances	22
	1.4.2 Limitaciones	23
1.5	Objetivos	23
	1.5.1 Objetivo principal	23
	1.5.2 Objetivos específicos	24
1.6	Hipótesis	24
	1.6.1 Hipótesis general	24
	1.6.2 Hipótesis específicas	24

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1	Antecedentes del estudio	26
2.2	Bases teóricas	32
	2.2.1 La energía solar y sus características	32
	2.2.2 Energía geotermal	33
	2.2.3 El destilador solar	35

2.2.4	La destilación solar	35
2.2.5	Balance energético y de masa en un destilador solar	36
2.2.6	Tipos de destiladores	39
2.2.7	Aguas geotermales	41
2.2.8	Toxicidad del arsénico	42
2.2.9	Eficiencia del destilador solar	43
2.2.10	El destilador geotérmico-solar de doble pendiente	43
2.2.11	Eficiencia del destilador geotérmico	44
2.2.12	Eficiencia del destilador geotérmico-solar	45
2.3	Definición de términos	45

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1	Tipo y diseño de la investigación	46
3.2	Población y muestra de estudio	46
3.2.1	Población de estudio	46
3.2.2	Muestra de estudio	46
3.3	Diseño y construcción del DGS	48
3.4	Reducción de la concentración de arsénico	51
3.5	Determinación del volumen de agua destilada	52
3.6	Caracterización térmica	53

CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1	Diseño y construcción del DGS	56
4.2	Reducción de la concentración de arsénico	58
4.2.1	Prueba estadística	59
4.3	Volumen de agua destilada	61
4.3.1	Volumen destilado con solo solar	61
4.3.2	Volumen destilado con solo geotermia	63
4.3.3	Volumen destilado con solar-geotermia	65
4.3.4	Prueba estadística	69
4.4	Caracterización térmica	70
4.5	Influencia de la lluvia y el granizo en el volumen de agua destilada	73
4.6	Eficiencia del destilador	74

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1	Diseño y construcción del DGS	77
5.2	Reducción de la concentración de arsénico	77
5.3	Volumen de agua destilada	79
5.4	Caracterización térmica-energética	81

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES 83**RECOMENDACIONES** 84**REFERENCIAS** 85**ANEXOS** 92

Análisis químico del contenido de arsénico de la fuente de agua geotermal del campo geotermal de Borateras	93
--	----

Análisis químico del contenido de arsénico del agua destilada bajo forma de funcionamiento solar-geotermal (SOGE)	94
---	----

Análisis químico del contenido de arsénico del agua destilada bajo forma de funcionamiento solo geotermal (SG)	96
--	----

Análisis químico del contenido de arsénico del agua destilada bajo forma de funcionamiento solo solar (SS)	98
--	----

Eficiencia de reducción de metales pesados de aguas geotermales de baja entalpía con el destilador geotérmico-solar	100
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nivel de riesgo químico del agua para consumo humano, por distrito de la Región Tacna 2009-2010	18
Tabla 2. Países y lugares en los que se han instalado destiladores solares de diferentes superficies de captación solar y materiales usados como cobertor	26
Tabla 3. Parámetros físico-químicos de ocho lugares del campo geotérmico de Borateras, Tacna, 2007	31
Tabla 4: Métodos de destilación existentes según el proceso físico escogido	40
Tabla 5. Valoración de diferentes características deseables para los métodos de destilación de agua existentes en el mercado	41
Tabla 6. Materiales y dimensiones principales del destilador geotérmico -solar de doble pendiente	57
Tabla 7. Valores de volúmenes de agua destilada (ml) y flujo volumétrico de agua (l/min) para la forma de funcionamiento solo solar (SS)	59
Tabla 8. Valores de volúmenes de agua destilada (ml) y flujo volumétrico de agua (l/min) para la forma de funcionamiento solo geotermia (SG)	61
Tabla 9. Valores de volúmenes de agua destilada (ml) y flujo volumétrico de agua (l/min) para la forma de funcionamiento solar+geotérmica (SOGE)	63
Tabla 10. Valores de la reducción de arsénico entre el inicial y el final bajo las tres formas de reducción del DGA y la eficiencia de reducción	65
Tabla 11. Volumen diario de agua destilada (Vd), flujo volumétrico de agua destilada horaria (Vh) y productividad (P) del DGS para las tres formas de funcionamiento	69
Tabla 12. Incremento del volumen de agua destilada bajo condiciones de lluvia y granizo bajo forma SOGE	74
Tabla13. Eficiencias y aportes energéticos para cada forma de funcionamiento del DGS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Potencial energético solar estacional en las cuatro provincias de la región Tacna, 2000-2011	29
Figura 2. Potencial energético geotérmico en la región sur del Perú, 2013	29
Figura 3. Vistas de dos sectores de afloramiento de aguas geotermales de baja entalpía en el campo de Borateras	31
Figura 4. Formas energéticas en que puede transformarse la energía solar en calor y electricidad	32
Figura 5. Diagrama de las formas en que la radiación solar llega a la superficie Terrestre	33
Figura 6. Esquema de un destilador solar de doble pendiente mostrando sus partes y las diferentes formas de transferencia de calor	37
Figura 7. Esquema del destilador geotérmico-solar de doble vertiente, diseñado, construido y evaluado experimentalmente	44
Figura 8. Vista del DGS de doble pendiente construido, mostrando los materiales utilizados en la construcción y la geometría correspondiente	49
Figura 9. Esquema del DGS diseñado para que funcione bajo tres formas diferentes con energía geotermia de baja entalpía y solar global	49
Figura 10. Vista integral del DGS mostrando el sistema hidráulico de ingreso y salida del agua geotermal	50
Figura 11. Arreglo experimental para el funcionamiento con aporte Geotérmico	50
Figura 12. Vista del DGS en funcionamiento solo geotermal durante la noche	51
Figura 13. Vista del arreglo hidráulico para el ingreso y salida del agua geotermal del DGS	52
Figura 14. Vista panorámica que muestra la estación meteorológica de monitoreo de datos, fuente de abastecimiento energético de dos paneles fotovoltaico con componentes	54
Figura 15. Diagrama esquemático para la evaluación experimental del DGS mostrando los puntos de monitoreo de parámetros térmicos y meteorológicos	54
Figura 16. Vista del DGS mostrando el sistema de adquisición automático de datos y sensores instalados	55

Figura 17. Vistas del sistema de adquisición y almacenamiento de datos construido usando el hardware libre Arduino	55
Figura 18. Esquema del DGS de doble pendiente en vista frontal	57
Figura 19. Esquema y dimensiones del DGS en vista superior	58
Figura 20. Esquema del DGS de doble pendiente en vista lateral	58
Figura 21. Contraste de la reducción de la concentración de arsénico (mg/L) entre valor inicial de la fuente (CIF) y final para cada forma de funcionamiento	60
Figura 22. Prueba de Bartlett de igualdad de varianzas RESI vs la concentración de arsénico bajo las tres formas de funcionamiento	60
Figura 23. Variación horaria del volumen de agua destilada por el DGS bajo la forma de funcionamiento solo solar (SS)	62
Figura 24. Variación horaria del volumen de agua destilada por el DGS bajo la forma de funcionamiento solo geotérmico (SG)	65
Figura 25. Variación horaria del volumen de agua destilada por el DGS bajo la forma de funcionamiento geotermia+solar (SOGE)	67
Figura 26. Variación horaria del volumen diario total acumulado de agua destilada por el DGS para las tres formas de funcionamiento	68
Figura 27. Variación horaria del volumen total de agua destilada por el DGS bajo las tres formas de funcionamiento	68
Figura 28. Contraste del volumen de agua destilada (ml) por cada una de las tres formas de funcionamiento del destilador geotérmico-solar	70
Figura 29. Variación de la temperatura del agua en la cubeta, del vapor en la cámara de vaporización y ambiental en función del tiempo	71
Figura 30. Variación de la temperatura del agua en la entrada y salida del DGS en función del tiempo	72
Figura 31. Variación de la temperatura de la superficie interior y exterior del vidrio cobertor en función del tiempo para forma SOGE	79

RESUMEN

El presente trabajo de investigación experimental tiene como objetivo diseñar y construir un destilador híbrido geotérmico-solar (DGS), de doble vertiente que funciona con dos fuentes energéticas renovables, la geotérmica de baja entalpia a flujo volumétrico de agua geotermal constante de 7,03 L/min y temperatura de 69 °C y la solar; de 0,80 m² de superficie captadora, para reducir la concentración de arsénico de aguas geotermales y aumentar el volumen de agua destilada del campo geotérmico de Borateras, Putina Chica, anexo Chillicollpa, provincia de Tarata, zona altoandina de la región Tacna, Perú, ubicada sobre los 4300 msnm, bajo tres formas: de funcionamiento solar-geotermia (SOGE), solo geotermia (SG) y solo solar (SS), bajo condiciones meteorológicas de la zona altoandina. Ha reducido la concentración de arsénico de 9,56 a 0,029 mg/l, con una eficiencia del 99,71% bajo las formas de funcionamiento solar-geotermia (SOGE) y solo solar (SS), y bajo la forma solo geotermia (SG) a 0,032 mg/l; asimismo se ha incrementado el volumen de agua destilada de agua geotermal de 4605 a 31601 ml/día, con una productividad promedio diaria de 40818 ml/m²día bajo la forma de funcionamiento SOGE; las eficiencias energéticas son de 29,68 %, 36,76 % y 12,27 % para las formas SOGE, SG y SS, respectivamente; la variación de la temperatura ambiente, la precipitación pluvial y el granizo propias de la zona, para un periodo de tres horas incrementa en un 18 % la producción del volumen de agua destilada.

Se ha desarrollado un prototipo de destilador geotérmico-solar experimental de tecnología simple, de bajo costo (\$ 333,00/m²), con materiales locales, el cual puede contribuir a mejorar la calidad de vida y salud poblacional altoandina y para otros usos, al producir agua potable con bajo contenido de arsénico para consumo humano; el cual puede ser replicado en otras regiones similares de nuestro país y otros, en concordancia con los objetivos 3, 6, 7 y 13 del desarrollo sostenible.

Palabras clave: arsénico, destilador, geotérmico-solar, volumen agua destilada, reducción

ABSTRACT

The present experimental research work aims to design and build a hybrid geothermal-solar distiller (GSD), with double slope that works with two renewable energy sources, the low enthalpy geothermal at a constant volumetric flow of geothermal water of 7,3 L/min and temperature of 69 °C and the solar; of 0,80 m² of collecting surface, to reduce the concentration of arsenic in geothermal waters and increase the volume of distilled water from the Borateras geothermal field, Putina Chica, Chillicollpa annex, Tarata province, high Andean area of the Tacna region, Perú, located over 4300 meters above sea level, under three forms of operation: solar + geothermal (SOGE), only geothermal (SG) and only solar (SS), under meteorological conditions of the high Andean area. The concentration of arsenic has been reduced from 9,56 to 0,029 mg/l, with an efficiency of 99,71% under the solar-geothermal (SOGE) and solar-only (SS) modes of operation, and under the geothermal-only (SG) mode to 0,032 mg/l; the volume of distilled water from geothermal water has also been increased from 4605 to 31601 ml/day, with an average daily productivity of 40818 ml/m²day under the SOGE mode of operation; the energy efficiencies are 29,68%, 36,76% and 12,27% for the SOGE, SG and SS modes, respectively; the variation in ambient temperature, rainfall and hail typical of the area, for a period of three hours increases the production of the volume of distilled water by 18%. An experimental prototype of a simple, low-cost (\$33,00/m²) geothermal-solar distiller has been developed, using local materials. It can contribute to improving the quality of life and health of the high Andean population and for other uses, by producing drinking water with low arsenic content for human consumption; which can be replicated in other similar regions of our country and others, in accordance with objectives 3, 6, 7 and 13 of sustainable development.

Keywords: arsenic, distiller, geothermal-solar, distilled water volume, reduction

INTRODUCCIÓN

En el mundo alrededor de 200 millones de personas están expuestas al agua no potable y alimentos con concentraciones de arsénico mayor a 0.01 mg/l y que la población requiere de mayor conocimiento y difusión sobre las fuentes de arsénico presente en el agua y alimentos, de los efectos de su toxicidad en la salud humana, como asimismo requiere de programas socioeconómicos, políticas públicas y culturales para que los humanos no se expongan a los efectos del arsénico y disminuir los riesgos en la salud, y continuar con investigaciones para encontrar procesos para el tratamiento rentable para eliminar el arsénico y otros contaminantes del agua (Alarcón & Gutiérrez, 2022).

En varios países de América Latina como Chile, Argentina, México, El Salvador, Nicaragua, Perú, Brasil, Colombia, Cuba, Guatemala, Honduras, México, Uruguay, Ecuador, y Bolivia, por lo menos 14 millones de personas están expuestas a los efectos del arsénico por consumir agua con concentraciones mayor a 10 µg/l, la mayor fuente se debe a la erosión del agua en rocas volcánicas y que los ríos transportan el arsénico desde montañas andinas a zonas bajas de alta densidad poblacional, lo cual es agravado por las actividades antropogénicas en áreas mineras que potencian la movilización del arsénico y otros contaminantes (Bundschuh et al., 2012); en tanto que (Huling et al., 2017) indican que la contaminación del agua con arsénico es una epidemia en muchas zonas del mundo, especialmente en países de Asia Central. (Bundschuh et al., 2021) sostienen que en Latinoamérica las potenciales fuentes de arsénico de diferentes orígenes son siete: vulcanismo y geo termalismo; la lixiviación natural y movilización acelerada de depósitos de minerales (sulfídicos) por la minería; yacimientos de carbón y su explotación; yacimientos de hidrocarburos y la producción de agua durante la explotación; transporte de solutos y sedimentos por los ríos hasta el mar; arsénico atmosférico en polvos y aerosoles; y por exposición a través de geofagia e ingestión voluntaria

Consumir permanentemente agua con niveles altos de arsénico, ponen en riesgo la salud, de tal magnitud que en algunos países se han convertido en un problema de salud pública. Según la Guía para la Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la DIRESA en nuestro país, establecen que la concentración de arsénico en el agua no debe de ser mayor a 0,01 mg/litro para no afectar la salud humana. En América Latina, los problemas de la gestión del agua son muy complejos y se acentúan por la falta de tecnologías bien establecidas y estudiadas para la desinfección y descontaminación, toda vez que las metodologías tradicionales de tratamiento son extremadamente caras, por lo que es necesario

el desarrollo de tecnologías simples, eficientes, de bajo costo, no contaminantes para la remoción de minerales de las aguas, desinfección de elementos patógenos y microbianos y para la desalación de agua de mar usando como fuente energética la energía solar, geotermia y otras renovables.

La destilación o desalación solar pueden ser aplicados a distintas escalas, desde destiladores pequeños domésticos para obtener unos cuantos litros de agua al día hasta grandes instalaciones con los que obtienen varios o miles de metros cúbicos diarios, para esto se han desarrollado una serie de sistemas desde los llamados destiladores solares hasta plantas de ósmosis inversa, estas últimas requieren de gran consumo de energía, a un costo actual del metro cúbico de agua desalada de alrededor de 0,8 euros, pero tales sistemas nunca se han construido para que funcione con energía propia del fluido de trabajo, como la proporcionada por el agua geotermal a una determinada temperatura, ni mucho menos para reducir la concentración de metales pesados y metaloides de aguas contaminadas naturalmente. En este contexto, (Sathyamurthy et al., 2017) indican que personas que habitan en zonas rurales y urbanas están siendo afectadas por consumir agua superficiales y subterráneas contaminadas, y que el agua salada contiene elementos disueltos y no disueltos no adecuados para fines domésticos, y que los destiladores solares integrados a colectores solares aumentan la producción de agua dulce.

La región Tacna con una población de aproximadamente 400 000 habitantes, el agua de sus cuatro cuencas hidrográficas contienen exceso de arsénico que afectan la salud poblacional costera y andina que limita el desarrollo socio económico, pero a su vez cuenta con el mejor potencial energético solar del país con promedio de $6,01 \text{ kWh/m}^2\text{día}$ de irradiancia solar global sobre una superficie horizontal y con seis campos geotermiales en la zona altoandina: Calientes, Borateras, Paucarani, Chungará-Kallapuma, Ancocollo y Tutupaca, con alto potencial energético de baja y alta entalpía, con muchas fuentes de aguas geotermiales con temperaturas entre $(10 - 90) \text{ }^\circ\text{C}$, aún inexploradas a pesar de sus grandes ventajas. En esta zona en el año 2021, los valores promedios de temperatura y humedad relativa ambiente fueron de $4,36 \text{ }^\circ\text{C}$ y $56,26 \%$, respectivamente. En registros históricos se alcanzan temperaturas de hasta $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, principalmente en época de heladas entre junio y agosto. Las bajas temperaturas ocurren principalmente por las noches. La oscilación térmica diaria promedio anual es de $30,65 \text{ }^\circ\text{C}$. Las precipitaciones son frecuentes principalmente entre diciembre y marzo, mientras que en la época de heladas son escasas, la velocidad promedio del viento es de $3,11 \text{ m/s}$.

Siendo el agua un elemento vital para la existencia de todo ser viviente sobre la tierra, en la región es muy escasa y con disponibilidad deficitaria que limita su desarrollo holístico, por tanto es inadmisibles que en el actual siglo XXI la población altoandina continúe consumiendo agua con altas concentraciones de arsénico superior a los límites máximos permisibles establecidos por organismos nacionales e internacionales, incumplándose con la normatividad vigente que afecta a la salud humana y el cultivo de alimentos.

En este escenario, se he diseñado, construido y evaluado el destilador híbrido geotérmico-solar (DGS) que funciona con dos fuentes energéticas renovables, la solar y geotérmica de baja entalpía, bajo tres formas de funcionamiento, que hace posible reducir la concentración de arsénico de aguas geotermales contaminadas naturalmente e incrementa la productividad de la producción de agua destilada (L/m² día), que rehundirá en mejorar la calidad de vida del poblador altoandino regional, para lograr el objetivo en los capítulos correspondientes se tratan aspectos del diseño, construcción, definiciones, resultados y conclusiones.

En el capítulo I, se realiza un enfoque sobre los antecedentes del problema en los ámbitos internacionales, nacionales y locales, se plantea la problemática de la investigación, su justificación e importancia, los objetivos y se plantea la hipótesis de que un destilador geotérmico-solar puede reducir la concentración de arsénico de aguas geotermales y aumentar el volumen de agua destilada por día para consumo poblacional; en el capítulo II se trata del marco teórico en la cual se sustente la tesis; en el capítulo III se aborda todo lo referente la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo experimental; en el capítulo IV se dan a conocer los resultados obtenidos en la investigación; en el capítulo V se realiza una comparación de los resultados obtenidos con las de otros investigadores en trabajos similares, para finalmente en el capítulo VI se plasman las conclusiones sobre la base de los objetivos y la hipótesis planteadas.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1 *Antecedentes del problema*

Aproximadamente cuatro millones de personas, en varios países de América Latina como Chile, Argentina, México, El Salvador, Nicaragua, Perú y Bolivia, beben permanentemente agua con niveles de arsénico por encima del nivel permisible que ponen en riesgo su salud de tal magnitud que se ha convertido en un problema de salud pública, en este escenario, la Agencia Interamericana para la Cooperación y Desarrollo (AICD), desarrolló el Proyecto OEA/AE/141, proponiendo las tecnologías de la Desinfección Solar (DSAUI-SODIS), Remoción de Arsénico por Oxidación Solar (RAOS-SORAS) y la Fotocatálisis Heterogénea Solar con Dióxido de Titanio (FH), todas dependientes de la energía solar (Litter et al., 2012), en tanto que (Ding et al., 2023) indican que el arsénico orgánico puede ser eliminado por el cuerpo humano y almacenarse como arsénico inorgánico que es altamente tóxico y peligroso para el medio ambiente debido a la conversión biológica, fotodegradación y fotooxidación; (Tomaszewska et al., 2020) establecen que el desafío para muchas comunidades de América Latina es encontrar soluciones adecuadas que sean factibles a sus condiciones económicas y técnicas locales para obtener agua con contenido de arsénico por debajo de 10 µg/l y que el proceso de destilación de membrana (MD) es el adecuado, usando energía geotermia de baja entalpía y el calor residual de plantas geotermiales.

Las explotaciones mineras, la contaminación del suelo, el agua, las plantas y animales debido a la industrialización, al uso de fertilizantes sintéticos, insecticidas químicos y otras actividades propias del desarrollo de la sociedad actual, han propiciado el aumento exagerado de metales pesados en las aguas como mercurio, plomo, arsénico, cadmio, cobre, cromo, entre otros, que causan alteraciones sobre el ambiente, afectando la salud humana, animal y de los ecosistemas (Londoño et al., 2016), (Reyes & González, 2016). Por otro lado en México, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Ecuador, Bolivia, Chile y Perú en zonas volcánicas existen dos fuentes de arsénico, el particulado proveniente de los gases volcánicos emitido en las fumarolas, y el contenido en las rocas de la estructura volcánica por solidificación de los gases de las fumarolas, por lo que las aguas en dichas cuencas hídricas están contaminadas naturalmente al contener concentraciones de arsénico por encima de los límites máximos permisibles, en algunos lugares superan los 73,6 mg/L, como también boro y

litio (López et al., 2012), (Yanez et al., 2005), en tanto que (Fouillac & Michard, 1981) indican que esto es un fenómeno natural que ocurre desde la antigüedad, detectado en pelo de momias hallados en dichos lugares.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) referente a la calidad del agua potable, establece que la presencia de arsénico en el agua para consumo humano y pecuario no debe exceder a 0,01 mg/L para no afectar la salud humana (OMS, 2006); en el Perú, el Reglamento de la Calidad de Agua para consumo humano, establece el mismo valor (Diresa, 2011).

Litter et al., (2012) indican que en América Latina, los problemas de la gestión del agua son muy complejos debido a la falta de tecnologías maduras para la desinfección, tratamiento y descontaminación, toda vez que las metodologías tradicionales son extremadamente caras, por lo que es necesario el desarrollo de tecnologías simples, eficientes, de bajo costo, no contaminantes para la remoción de minerales de las aguas, desinfección de elementos patógenos y microbianos y para la desalación de agua de mar, usando como fuente energética las energías renovables. (Kumar et al., 2019) recomiendan que en Latinoamérica los criterios a tener en cuenta para la selección tecnológica para la remoción de arsénico es que deben ser de tecnología simple, fácil configuración e instalación, de bajo mantenimiento, construidos con materiales disponibles localmente, de bajo costo y eco amigables.

A nivel nacional, en Apurímac se han realizado estudios con aguas con arsénico bajo el método RAOS con concentraciones de 6,7 y 0,2 mg/litro, obteniéndose una reducción de hasta el 98,5 % del arsénico total, bajo irradiancia solar promedio de 612,1 W/m² en seis horas, con concentración de 6 gFe/L de agua, con 1,3 ml de jugo de limón (Chávez & Toledo, 2011). En tanto que en la zona sur del Perú las concentraciones de arsénico en el agua de consumo son elevadas, ya sea por razones geogénicas; lo que constituye un riesgo para la salud de sus pobladores (Pérez, 2013).

La Mesa de Concertación de la Lucha Contra la Pobreza (MCLCP, 2017) de la región Tacna, informa que de un total de 52 comunidades estudiadas el 65 % registran niveles de arsénico por encima del LMP de 0,01 mg/L (Tabla 1), la presencia de arsénico en el ámbito rural es debido a una contaminación natural de las fuentes de agua, por lo tanto es necesario la búsqueda de otras fuentes de abastecimiento o la implementación de tecnologías de remoción de este metaloide considerando que el agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio.

En esta región, se tiene muy pocos reportes sobre la destilación de agua de mar y de aguas contaminadas naturalmente para uso poblacional usando en forma mixta la energía

geotérmica y la solar, por lo que la descontaminación de aguas naturales con destiladores solares-geotérmicos es fundamental para contribuir a dotar de agua para consumo humano, contribuyendo a mejorar la salud y calidad de vida poblacional, reducción de la pobreza y mejorar la dignidad humana (Litter & Ingallinella, 2010).

Tabla 1

Nivel de riesgo químico del agua para consumo humano, por distrito de la Región Tacna 2009-2010.

N°	PROVINCIA	DISTRITO	NIVEL DE RIESGO QUIMICO 2010	AGENTE PELIGROSO
1	TACNA	TACNA-CIUDAD	MEDIANO	Aluminio (0.31 mg/L)
2		POCOLLAY	MEDIANO	Aluminio (0.31 mg/L)
3		G. ALBARRACIN	BAJO	
4		CIUDAD NUEVA	MEDIANO	Aluminio (0.31 mg/L)
5		ALTO DE LA ALIANZA	MEDIANO	Aluminio (0.31 mg/L)
6		SAMA INCLAN	ALTO	Arsénico (0.24 mg/L)
7		SAMA LAS YARAS	ALTO	Arsénico (0.15 mg/L)
8		PACHIA	ALTO	Aluminio (0.519 mg/L); Cadmio (0.0099 mg/L); Plomo (0.062 mg/L); Antimonio (0.035 mg/L)
9		CALANA	ALTO	Aluminio (0.45 mg/L); Plomo (0.046 mg/L); Cadmio (0.0067 mg/L)
10		PALCA	BAJO	
11	TARATA	TARATA	MEDIANO	Aluminio (0.42 mg/L); Hierro (0.221 mg/L)
12		TICACO	MEDIANO	Hierro (0.416 mg/L)
13		TARUCACHI	ALTO	Plomo (0.038 mg/L); Sulfatos (900 mg/L)
14		SUSAPAYA	BAJO	
15		SITAJARA	BAJO	
16		CHUCATAMANI	MEDIANO	Boro (1.7 mg/L); Hierro (1.3 mg/L)
17		ESTIQUE	BAJO	
18		ESTIQUE PAMPA	ALTO	Plomo (0.028 mg/L)
19	CANDARAVE	CANDARAVE	ALTO	Arsénico (0.3 mg/L)
20		CAIRANI	ALTO	Arsénico (0.58 mg/L)
21		CAMILACA	BAJO	
22		CURIBAYA	ALTO	Arsénico (0.60 mg/L)
23		QUILAHUANI	ALTO	Arsénico (0.27 mg/L)
24		HUANUARA	ALTO	Arsénico (0.40 mg/L)
25	J. BASADRE	ITE	ALTO	Arsénico (0.33 mg/L)
26		LOCUMBA	BAJO	
27		ILABAYA	ALTO	Arsénico (0.059 mg/L); Boro (3.5 mg/L)

Tomado de DIRESA Tacna – PVICA (2017)

1.1.2 Problemática de la investigación

En la zona altoandina de la región Tacna se encuentran seis campos geotérmicos situados sobre los 4000 msnm, por los cuales pasa el cinturón de fuego de Sudamérica, destacando los de Calientes, Borateras, Chungará-Kallapuma, Anccollo, Tutupaca y Paucarani, de los cuales emergen más de 140 fuentes de aguas geotermales con flujos de agua entre (4,70-78,60) L/s a temperaturas entre (10-90) °C, con concentración de arsénico entre (0,02-14,80) mg/L y otros metales pesados como el azufre, boro, litio, hierro, etc. que contaminan las cuencas hídricas de la región, (Cruz et al., 2013), superiores a los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la OMS y la DIRESA, que afectan a la salud poblacional y al cultivo agrícola de la región.

El uso de la energía geotérmica se realiza en países que cuentan con el recurso, con múltiples aplicaciones, desde la generación de energía eléctrica a gran escala (Bertani, 2016), (Bertani, 2012), bajo diferentes principios de funcionamiento como lo indican (Fan & Ma, 2007), (Frick & Schröder, 2010), a diferentes eficiencias energéticas y uso en invernaderos, calefacción de ambientes, refrigeración, piscinas de uso recreativos, turísticos según lo establecido por (Barbier, 1997),-(Mimfopoulos & Katirtzoglou, 1977) tratan sobre aspectos medioambientales de esta energía, (Torres & Mejia, 2016) sobre costos de la energía obtenida. En tanto que, (Christiansen et al., 2021) informan que en los andes centrales de Argentina-Piscuanta, el flujo de calor de geotermia de baja entalpía es de 60 mW/m² a temperatura de 95 °C del reservorio, con un gradiente térmico medio de 30°C/km, que puede producir una potencia de (30-280) KW y el calor remanente puede utilizarse en secadores solares de frutas, invernaderos, procesamiento de alimentos y destilación con membrana para remover arsénico y otros contaminantes.

Dichas aguas al emerger a diferentes temperaturas poseen energía térmica como calor sensible de baja entalpía que puede ser utilizada para el auto funcionamiento continuo de destiladores durante las 24 horas del día, meses y años, bajo el principio físico de la evaporación-condensación, con lo cual se puede destilar y reducir la concentración de metales y metaloides, aptas para el consumo humano y otros usos; al potencial energético geotérmico, se suma el alto potencial energético solar regional equivalente a 6,04 kWh/m²día en promedio anual sobre superficie horizontal, ambos recursos, limpios, renovables, gratuitos, descentralizados, disponibles se pueden utilizar para el funcionamiento de un destilador geotérmico-solar, bajo tres formas: sólo solar (SS), sólo geotermia (SG) y solar + geotermia

(SOGÉ) a efectos de evaluar la reducción de la concentración de arsénico y el volumen de agua destilada, bajo las condiciones meteorológicas de la zona de estudio.

Actualmente, a nivel mundial existen tecnologías utilizando diferentes procesos para la remoción de arsénico de diferentes tipos de aguas, sobre todo del tipo física, química y biológica pero con alto costo de producción que generan residuos que impactan el medio ambiente, pero falta las de tecnologías simples y funcionales que sean accesibles a la población rural, que usen la energía geotérmica y solar disponibles en dichas zonas, falta mayor difusión y conocimiento de la población de las consecuencias en la salud humana de consumir agua con alto contenido de arsénico o consumir alimentos cultivados con estas aguas, asimismo que la población exija a sus autoridades distritales, provinciales y regionales que se les dote de agua para consumo humano con niveles de concentración de arsénico por debajo de los límites establecido por organismos nacionales e internacionales en un escenario de justicia social.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 *Problema Principal*

¿El uso de un destilador geotérmico-solar (DGS) diseñado y construido, bajo tres formas de funcionamiento permitirá reducir la concentración de arsénico de aguas geotermales y aumentar el volumen de agua destilada para consumo humano en la zona altoandina de la región Tacna?

1.2.2 *Problemas secundarios*

¿Un nuevo diseño y construcción de un destilador geotérmico-solar permitirá reducir la concentración de arsénico y aumentar el volumen de agua destilada de aguas geotermales bajo tres formas de funcionamiento en la zona altoandina de la región Tacna?

¿Cuál será el porcentaje de la reducción de la concentración de arsénico (mg/L) de las aguas geotermales obtenida con un destilador geotérmico-solar bajo tres formas de funcionamiento en la zona altoandina de la región Tacna?

¿Cuál será el volumen (L) de agua que se obtenga con un destilador geotérmico-solar bajo tres formas de funcionamiento para consumo humano en la zona altoandina de la región Tacna?

1.3 Justificación e importancia de la investigación

1.3.1 Justificación de la Investigación

Justificación ambiental y social

Actualmente, las principales instituciones científicas internacionales recomiendan que para adaptarnos y mitigar el cambio climático disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂, debemos utilizar masivamente fuentes energéticas limpias y renovables como la energía solar, geotérmica, biomasa, hidráulica, etc. y desarrollar programas de eficiencia y ahorro de energía (IPCC, 2007). Por otro lado, nuestro planeta Tierra está constituida por dos tercios de agua y un tercio por los continentes, el 99 % del agua está contenido en los mares como agua salada, mientras que solo el 1 % como agua dulce contenida en los ríos, lagos, lagunas, nevados, humedad ambiental, polos, árboles y agua subterránea, la cual está disponible para el consumo humano, agropecuario e industrial, mayormente contaminadas por las actividades antropogénicas. En muchas regiones presentan contaminación natural con altos contenidos de arsénico, metales pesados, y otros metaloides, nocivos para la salud humana, ecosistemas y el cultivo agrícola; esta disponibilidad es muy heterogénea y variable en el espacio territorial regional, nacional y mundial dependiendo de su geografía y climatología; las aguas de las cuatro cuencas hidrográficas de la región presentan los problemas indicados. Con el desarrollo del trabajo de investigación se pretende contribuir a solucionar la contaminación de aguas naturales geotermales con el desarrollo de la tecnología de destilación de bajo costo, que haga posible la reducción de arsénico de las aguas geotermales, a efectos de mejorar la calidad de vida poblacional, utilizando como dos fuentes energéticas renovables la solar y geotermia de baja de alto potencial regional, caracterizadas por ser limpias, descentralizadas, gratuitas y renovables, que garantizan seguridad, autonomía y cambio de matriz energética.

Justificación tecnológica – científica

Actualmente, la tecnología para la descontaminación de aguas a diferentes escalas con el uso de los combustibles fósiles ha alcanzado cierto grado de desarrollo pero con costos energéticos y ambientales relativamente altos, la región permanentemente padece de déficit y estrés hídrico, bajo un crecimiento en la demanda de agua potable debido al crecimiento

poblacional y agrícola, por lo que es importante desarrollar tecnologías locales simples, eficientes, de bajo costo, no contaminantes, que utilicen como fuente energéticas las energías renovables, que contribuyan a ser parte de la solución de la problemática indicada y mejorar la calidad de vida y la salud de la población involucrada, a través del desarrollo de sistemas y tecnologías que utilicen la energía solar y la geotérmica disponibles en la zona, desarrollar el “now how” de dichos procesos y tecnologías, considerando que el agua es esencial para la vida, dignidad humana y es un derecho humano.

1.3.2 Importancia del estudio

El presente estudio es importante, en la medida que va a permitir contar con una tecnología que puede contribuir a solucionar o ser parte de una solución a un problema crítico de la región Tacna referente a la descontaminación de aguas contaminadas naturalmente con altos contenidos de arsénico y metales pesados en la zona altoandina, para aumentar la oferta hídrica aumentar la disponibilidad de agua para consumo humano y otros usos, principalmente para mejorar la calidad de vida de la población rural andina y de la población en general, al disponer de agua para consumo humano con una baja concentración de arsénico y no se expongan a los efectos tóxicos sobre la salud humana, usando energías limpias y renovables de alto potencial regional como la solar y la geotérmica de baja entalpía, y que los resultados se puedan extrapolar a otras regiones nacionales e internacionales con una problemática similar.

Es urgente contar con tecnologías simples, como los sistemas denominados destiladores híbridos geotérmicos-solares, como un nuevo tipo de sistema de destilación de aguas geotermales que la reduzca la concentración de arsénico y metales pesados eficientemente, e incremente el volumen diario de agua destilada para consumo diverso, de bajo costo, que se construyan con materiales que se adquieran en el mercado nacional y local, modulares que funcionen con energías renovables como la geotermia de baja entalpía y la solar que son de altos potenciales regionales, que contribuya a la solución de la toxicidad del arsénico en la salud humana mejorando la calidad de vida de la población altoandina y regional en el contexto del desarrollo sostenible.

1.4 Alcances y Limitaciones

1.4.1 Alcances

Los alcances del proyecto en su ámbito geográfico se circunscribe a los seis campos geotérmicos de la zona altoandina de la región Tacna y de zonas que cuentan con recurso hídrico

geotermal de baja entalpía que emergen a la superficie terrestre con temperaturas entre los (10 - 100)°C con alto contenido de arsénico, boro, litio, hierro; específicamente a comunidades de los lugares indicados, los resultados serán de conocimiento de los dirigentes de las comunidades altoandinas, alcaldes distritales y provinciales, gobierno regional, dirección regional de salud, empresa prestadora de saneamiento (EPS) y del Proyecto Especial Tacna (PET), a efectos de conocimiento, implementación y difusión de los resultados obtenidos, extrapolables a zonas similares de nuestro país y de otros países.

1.4.2 Limitaciones

Las limitaciones para el desarrollo de la investigación son muchas, como el escaso y difícil acceso al lugar de estudio ubicado sobre los 4300 msnm, ubicada a 160 Km de la ciudad de Tacna, 140 Km asfaltada y 20 km de trocha carrozable, el cual no cuenta con energía eléctrica convencional, alojamiento y alimentación para el investigador y colaboradores, nulo servicio de saneamiento básico; condiciones meteorológicas extremas: bajas temperaturas (heladas) en invierno, fenómenos naturales eléctricos permanentes (truenos, rayos, relámpagos), ráfagas de vientos en toda época del año, fuertes lluvias en verano, geografía accidentada, cero comunicación bajo medios como la radio, TV, teléfono e internet; lugar ubicado en la zona de extrema pobreza regional, falta de algunos equipos para la evaluación experimental del prototipo; por otro lado a nivel mundial y nacional no se cuenta con información o data científica suficiente sobre el tema, carencia absoluta de experiencias sobre el uso de destiladores mixtos geotérmicos-solares que funcionen continuamente las 24 horas del día, aprovechando la energía solar y geotermia de baja entalpía, requerimiento de alquiler de movilidad para el traslado de personas, equipos y materiales que representa un costo diario muy alto, por lo que para solventar los gastos que demanda el proyecto se requiere del apoyo y presupuesto institucional y personal.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un prototipo de destilador geotérmico-solar (DGS) para reducir la concentración de arsénico (mg/L) de aguas geotermiales y aumentar el volumen (L) de agua destilada bajo tres formas de funcionamiento para consumo humano en la zona altoandina de la región Tacna.

1.5.2 *Objetivos específicos*

Diseñar y construir un destilador geotérmico solar para que funcione bajo tres formas, reduzca la concentración de arsénico y destile agua de aguas geotermiales usando como fuentes energéticas renovables la solar y la geotermia en la zona altoandina de la región Tacna.

Cuantificar el volumen (L) de agua destilada en la unidad de tiempo con el destilador geotérmico-solar, que usa como fuente energética la energía solar y la geotérmica, bajo tres formas de funcionamiento en la zona altoandina de la región Tacna.

Determinar la reducción de la concentración de arsénico (mg/L) de aguas geotermiales usando un destilador geotérmico-solar bajo tres formas de funcionamiento para consumo humano en la zona altoandina de la región Tacna.

1.6 Hipótesis

1.6.1 *Hipótesis general*

El destilador geotérmico-solar (DGS) diseñado y construido permite reducir la concentración de arsénico (mg/L) de aguas geotermiales y aumentar el volumen de agua destilada para consumo humano en la zona altoandina de la región Tacna, bajo tres formas de funcionamiento usando como fuentes energéticas la geotermia y la solar.

1.6.2 *Hipótesis específicas*

El destilador geotérmico-solar diseñado y construido, funciona bajo tres formas diferentes, usando como fuentes energéticas renovables la solar y la geotermia en la zona altoandina de la región Tacna.

El destilador geotérmico-solar, bajo tres formas de funcionamiento permite incrementar el volumen (L) de agua destilada para consumo humano usando como fuentes energéticas la energía geotérmica y solar en la zona altoandina de la región Tacna.

El destilador geotérmico-solar bajo tres formas de funcionamiento reduce la concentración de arsénico (mg/L) de aguas geotermales para consumo humano en la zona altoandina de la región Tacna, usando como fuentes energéticas la energía geotérmica y solar.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Antecedentes internacionales

Los principios de la destilación solar de agua de mar pueden ser aplicados a distintos sistemas, desde pequeños destiladores domésticos para obtener unos cuantos litros de agua por día hasta grandes instalaciones con los que obtienen varios o miles de metros cúbicos diarios (Maldonado, 2002), en tanto (Arellano, 2011) indica que la primera gran planta de destilación solar funcionó en 1874 en el desierto de Atacama, Chile, producía hasta 22 500 litros de agua diarios y funcionó hasta 1907, contaba con una superficie de captación superior a los 4 000 m². Desde entonces, otras grandes instalaciones de este tipo se han desarrollado en diversas zonas del mundo con escasez de agua y acceso al mar, como Israel, Islas Canarias y en diversas islas áridas del mediterráneo entre otras (González & Ruiz, 2013). La destiladora solar de mayor tamaño del mundo está en la isla de Patmos (Grecia) que cuenta con una superficie superior a los 8 000 m² (Nandwani, 2013).

En varios países desde 1963 se han construido y evaluado diferentes tipos de destiladores solares, destacando en Latinoamérica Chile y México; Chile construye su primer destilador en 1872 en Las Salinas ubicada en el desierto de Atacama con un área de colector de 4 460 m² usando como material cobertor el vidrio, en tanto que en México en 1969 se construye y evalúa el primer destilador solar en la ciudad de Natividad con una superficie captadora de 95 m², también usando como material cobertor el vidrio y plástico (Nandwani, 2013), los cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2

Países y lugares en los que se han instalado destiladores solares de diferentes superficies de captación solar y materiales usados como cobertor.

PAIS	LUGAR	AÑO	AREA (m ²)	COBERTOR
Australia	Mureske	1963	372	Vidrio
	Cooper Pedy		3 160	Vidrio
Chile	Las Salinas	1872	4 460	Vidrio
	Quillagua	1968	100	Vidrio
Grecia	Symly	1964	2 686	Plástico
	Patmos	1967	8 600	Vidrio

India	Bhavnagar	1965	377	Vidrio
	Awania	1978	1 866	Vidrio
	Kulmis	1980	3 000	Vidrio
Mexico	Natividad	1969	95	Vidrio
Pakistan	Gwadar-I	1969	306	Vidrio
	Gwadar-II	1972	9 072	Vidrio
Tunisia	Mahdla	1968	1 300	Vidrio
USA	Daytona Beach	1959	228	Vidrio
	Daytona Beach	1963	148	Plástico
URSS (cei)	Bakharden	1969	600	Vidrio
West Indies	Petite St.	1967	1 710	Vidrio
	Vincent			Plástico
China	Wuzhi	1976	385	Vidrio

Tomado de Nandwani (2013)).

En tanto que, Colmenares & Pinzon, (2008), indican que bajo el análisis teórico, de materiales a usarse en la construcción y las características ambientales de la zona, es posible usar el destilador solar como una alternativa para obtener agua potable; en tanto que (Panchal & Professor, 2011) establecen que el destilador solar es un dispositivo simple para obtener agua potable para consumo humano, puede construirse fácilmente con materiales de cada lugar, el mantenimiento es mínimo y fácil de construirlo, y que el incremento de la irradiancia solar aumenta la productividad del equipo. (Sengar & Mohod, 2012), sostienen que se han desarrollado diferentes tipos de destiladores solares, mayormente con un área de captación de 1 m² usando fibra de vidrio, metales, con cobertor de vidrio a diferentes pendientes, con doble vidrio se produce 1 350 y con uno 1 550 mL/día, el que usa plástico como cobertor destila 2 104 mL/día, entre otros ensayos; (Nandwani & Vonkoller, 1986) indican que el destilador de cobertor de vidrio presenta mayor rendimiento que el destilador con cobertor de plástico, que la cantidad de agua destilada varía entre 2 a 4 litros/m²día y que dentro del destilador hay una pérdida de agua del 25 al 60 % y que el enfriamiento artificial del vidrio cobertor con agua acelera el proceso de condensación. Asimismo, (Ugwuoke & Ukwuani, 2006), concluyen que un destilador de 0,68 m² en cinco días de evaluación ha obtenido 2,3 L/día como valor máximo y que con mayor irradiancia solar se incrementa la producción de agua destilada; en tanto que, (Torchia et al., 2014) establecen que los parámetros geométricos, ambientales y de operación del destilador influyen en el fenómeno de vaporación y condensación, y que dichos sistemas pueden ser clasificados desde el punto de vista termodinámico.

En tanto que, Marchesi & Fasulo, (2008), indican que con un destilador solar colector-acumulador (DCSA) la producción de agua destilada se incrementa en un 70% respecto al obtenido con un destilador tipo batea de superficie captadora plana; similarmente (Yabroudi &

Herrera, 2011) comunican que con un destilador tubular obtienen un volumen medio de 2,42 L/m² día, con un máximo de 3,34 y mínimo de 0,93 L/m² día, con buena calidad del agua destilada, el equipo presenta una eficiencia del 99% en la remoción de cloruros y sólidos disueltos totales; en tanto que (Voropoulos & Belessiotis, 2003), concluyen que, con un destilador solar de 12,5 m² de superficie colectora acoplado a un tanque auxiliar de almacenamiento de agua caliente de 3750 L, en el día destila 386,31 L y la noche 447,51 L y que el rendimiento del sistema depende del clima del lugar y del brillo solar.

Así mismo, Cornejo et al., (2004), indican que es factible la descontaminación de arsénico con una eficiencia del 99 % usando hierro y jugo de limón en muestras reales y sintéticas. Malaiyappan & Elumalai, (2017), indican que, con un destilador con material poroso de granito negro en la cubeta, con un vidrio como cobertor de una pendiente, presenta mayor producción de agua destilada respecto a otro similar sin material poroso; (Torres & Mejía, 2016) han desarrollado una herramienta computacional que puede estimar la cantidad de agua producida por estos dispositivos, que permite dimensionar el diseño adaptado a los requerimientos de los usuarios.

Por otro lado, López et al., (2012), indican que desde los numerosos volcanes con fumarolas o inactivos emanan aguas con altas concentraciones de arsénico y otros elementos tales como el boro y el litio, los cuales son descargados a las aguas superficiales de las cuencas correspondientes, en tanto que (Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003), establecen que la energía geotérmica es limpia y sustentable pero su aplicación produce algunos impactos ambientales, los cuales deben ser considerados en cualquier proyecto de desarrollo geotérmico para ser mitigados, los impactos son físicos y con efectos del calor y residuos químicos sobre en el suelo, que afectan al medio ambiente biológico; sin embargo (Lund, 2007), indica que probablemente los primeros humanos utilizaron la energía geotermia para cocción alimentos, piscinas naturales, para mantenerse caliente, y que en las Américas ocuparon lugares calientes por más de 10 000 años para recuperarse de las batallas y como refugio.

Antecedentes nacionales

A nivel nacional, en Apurímac se han realizado estudios con aguas con arsénico bajo el método RAOS con concentraciones de 6,7 y 0,2 mg/litro, obteniéndose una reducción de hasta el 98,5 % del arsénico total, bajo irradiancia solar promedio de 612,1 W/m² en seis horas, con concentración de 6 gFe/L de agua, con 1,3 ml de jugo de limón (Chávez & Toledo, 2011). En tanto que en la zona sur del Perú las concentraciones de arsénico en el agua de consumo son

elevadas, ya sea por razones geogénicas; lo que constituye un riesgo para la salud de sus pobladores (Pérez, 2013).

Por otro lado, (Chávez & Toledo, 2011) indican que los tratamientos convencionales para la remoción de arsénico, son costosos y aplicables sólo en poblaciones urbanas; (Polo & Mamani, 2013) indican que, con un destilador solar tubular para desalinización de agua de mar, bajo las condiciones meteorológicas de la ciudad de Tacna, el factor de producción promedio de agua destilada en días soleados es de 2950, en días semi nublados 1600 y 200 ml/m²día en días nublados;

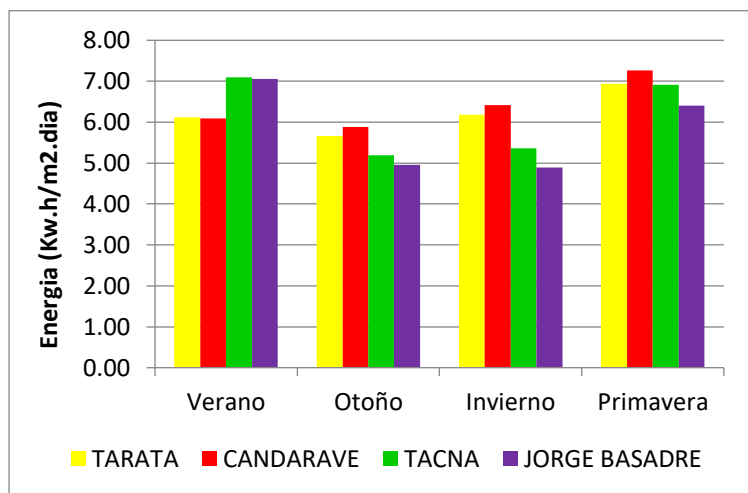
Por otro lado, (Cruz et al., 2013), informan que en la zona altoandina de la región Tacna en las provincias de Tarata y Candarave se cuenta con muchas fuentes de aguas geotermales a diferentes temperaturas entre (10–90) °C y flujos volumétricos variados a baja entalpía, cuyo potencial energético se desconoce, debido a que se encuentran en zonas volcánicas correspondiente al cinturón de fuego de la cordillera de los andes, en estas zonas la temperatura ambiental anual fluctúa entre los (-20 – 15) °C, que el mayor potencial geotérmico se encuentre en el sur del Perú entre las regiones de Tacna y Arequipa igual a 1300 MW, en tanto que el nacional es de 3000 MW, hasta la fecha inexplotados (Lapus & Neira, 2016), (Cruz et al., 2013); en tanto que (Muñoz et al., 2014) corroboran lo indicado por Cruz et al., y que el Perú cuenta con legislación geotérmica que promueve la participación del sector privado, pero que falta articulación entre los actores como el gobierno central, comunidades y las empresas geotérmicas, sumado la falta de legislación ambiental sobre la industria geotérmica (Figura 2).

Antecedentes locales

Polo et al., (2013), indican que la región Tacna cuenta con el mejor potencial energético solar del país equivalente a 6,04 kWh/m²día de irradiancia solar global sobre superficie horizontal en promedio anual, equivalente a 0,51 L/m² de petróleo en promedio diario por metro cuadrado del desierto, en tanto que la provincia con mayor potencial solar es la de Candarave entre los meses de Setiembre, octubre, noviembre y diciembre, fundamentalmente en la estación primaveral y en verano es mayor en las provincias de Tacna y Jorge Basadre, en tanto que en las estaciones de otoño e invierno alcanzan valores mínimos (Figura 1).

Figura 1

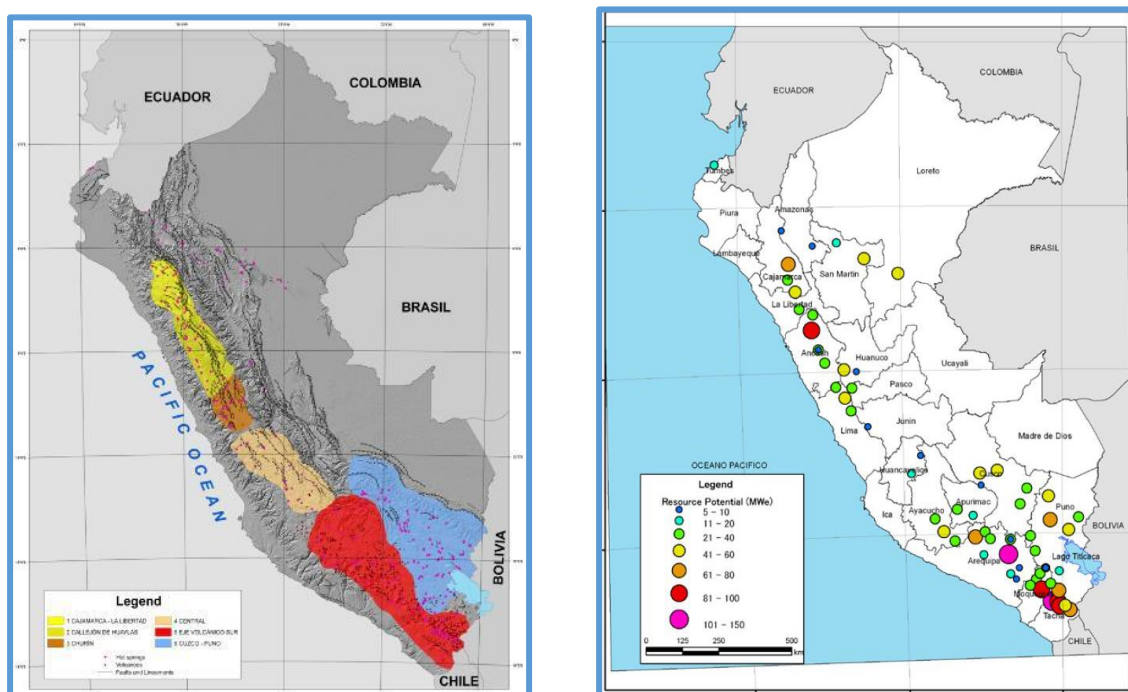
Potencial energético solar estacional en las cuatro provincias de la región Tacna, periodo 2000-2011.



Tomado de (Polo, 2013).

Figura 2

Potencial energético geotérmico en la región sur del Perú, 2013



Tomado de (Cruz et al., 2013).

En el campo geotérmico de Borateras (Figura 3), ubicado en la cordillera occidental del Perú sobre los 4300 msnm, circundado por una cadena de centros volcánicos inactivos y el valle formado por el río Maure, con precipitaciones pluviales máximas anuales que sobrepasan los

250 mm, con temperaturas en invierno por debajo de 0 °C. Presenta fallas regionales y locales que controlan la surgencia de fuentes termales en la quebrada de Putina; los acuíferos y acuitardos producen caudales de aguas hacia la superficie de 7 l/s con temperaturas entre (43,5 – 86,0) °C, se han encontrado 40 emanaciones de aguas geotermales, 38 de estas con aguas a diferentes temperaturas, dos con emanación de vapor de agua, con altas concentraciones de arsénico en el rango de 1,85 a 14,80 mg/L y la de boro entre 16,5 a 95,4 mg/L, además de la presencia de otros metales pesados, muy por encima de los valores máximos permisibles establecidos por organismos nacionales e internacionales, con flujos de agua comprendidos entre 10 a 300 L/min (Vargas et al., 2012), (Tabla 3).

Figura 3

Vistas de dos sectores de afloramiento de aguas geotermales de baja entalpía en el campo de Borateras, anexo de Chillicollpa, Putina, Tarata.



Tabla 3

Parámetros físicos-químicos de ocho fuentes de aguas geotermales del campo geotérmico de Borateras, Tacna, 2007.

FUENTE	Altura (msnm)	Tem p agua (°C)	Temper. Ambient (°C)	Conductiv Eléctrica (µS/cm)	Flujo de agua (L/min)	Arsénico (mg/L)	Boro (mg/L)
Putina Grande	4 535	72,2	13,2	215	-	-	-
Putina Chica A	4 376	86,0	14,6	6 880	300	14,80	95,4
Putina Grande B	4 363	82,5	15,1	5 340	100	9,42	72,7
Calachaca	4 295	43,6	17,9	1 590	200	1,55	16,5

Pozo Pampa Borateras	4 326	59,0	13,7	3 520	200	5,64	43,4
Fuente lado río Maure	4 304	47,3	17,2	3 220	10	4,83	39,6
Vilavhaullani	4 362	12,4	15,2	107	300-500	0,02	-
Rio Maure	4 281	25,2	15,7	2 000	-	2,28	-

Tomado de (Vargas et al., 2012)

En esta región, se tiene muy pocos reportes sobre la destilación de agua de mar, residuales, salinas y ninguna de aguas geotermales contaminadas naturalmente con alto contenido de arsénico para uso poblacional usando fuentes energéticas renovables mixtas como la energía geotérmica de baja entalpía y la solar.

2.2 Bases teóricas

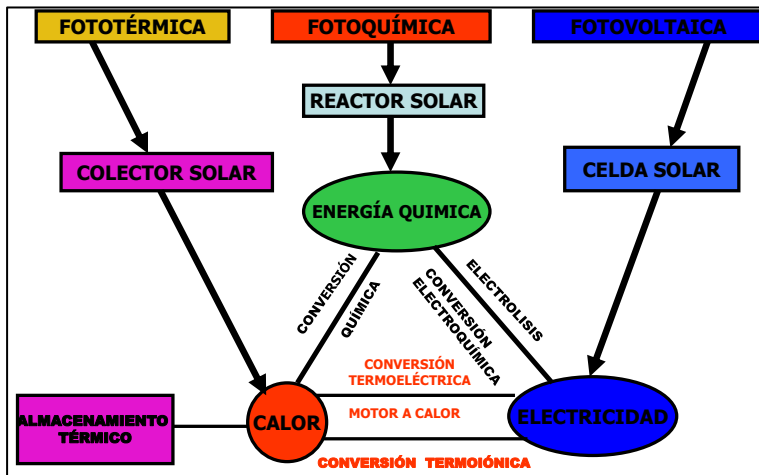
2.2.1 La energía solar y características

La radiación solar o energía solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol, el cual se comporta como un cuerpo negro que emite energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura superficial de unos 6000 K, se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, no toda llega la superficie de la Tierra, pues las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra se denomina irradiancia solar, que se cuantifica como energía por unidad de tiempo y área, su unidad son los W/m^2 .

La energía electromagnética proveniente del sol, al llegar a la superficie terrestre se puede transformar en energía calorífica y energía eléctrica, bajo tres procesos fundamentales energéticos: la conversión fototérmica, fotoquímica y fotovoltaica, las cuales se pueden almacenar y usar indistintamente, para esto se debe de tener un colector solar térmico, un reactor solar (fotosíntesis) y una celda solar que funciona bajo el efecto fotovoltaico (Polo, 2013),(Chasseriaux, 1990) (Figura 4). La energía solar llega sobre la superficie terrestre a la cual se denomina irradiancia solar, bajo tres formas: radiación difusa, directa y global que es la suma de la directa y difusa, parte es absorbida por la superficie terrestre y otra reflejada al espacio (Figura 5). La energía solar tiene longitudes de onda entre (0,15 – 4) micras por lo que puede ionizar un átomo, excitar electrones, disociar una molécula o hacerla vibrar.

Figura 4

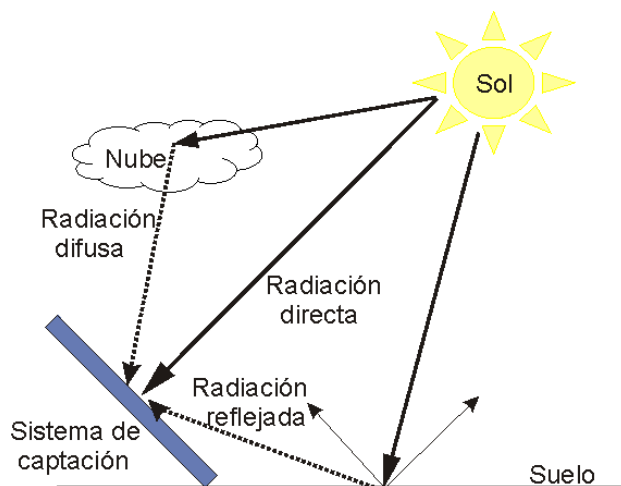
Formas energéticas en que la energía solar puede transformarse en calor y electricidad.



Tomado de (Polo, 2013)

Figura 5

Diagrama de las formas en que la radiación solar llega a la superficie terrestre.



Tomado de (Duffie & Beckman, 2003)

2.2.2 Energía Geotérmica

Puede entenderse como un recurso natural vinculada a la energía obtenida a partir del aprovechamiento del calor interno de la Tierra (Cruz et al., 2014).

La energía geotérmica puede hacer uso de las aguas termales que se encuentran a poca profundidad y que emanan en forma de agua caliente y vapor (Gamboa & Dufour, 2015). En el sector más superficial de la corteza terrestre, la temperatura aumenta en un valor promedio de

3 °C por cada 100 m. de profundidad, conocida como gradiente geotérmico, cuando los valores de ese gradiente se encuentran entre 2 °C y 5°C cada 100 m. se consideran normales, mientras que los valores que para gradientes que exceden 5°C/100 m, a profundidades de 1500 m. la temperatura será de 180°C aproximadamente (IEG, 1987), (Karydakis et al., 2005).

En tanto que, (Ambriz-Díaz et al., 2021) indican que la energía geotérmica de baja temperatura es un recurso abundante y rentable pero con limitaciones técnicas y económicas para la generación de electricidad, pero con un papel muy importante en los sistemas de poligeneración; (Cárcel & Martínez, 2015) indican que la geotermia de baja entalpía puede ser una buena alternativa para mejorar la eficiencia energética y el uso de energías renovables, para ser usada en múltiples aplicaciones industriales y domésticas con rendimientos importantes con instalaciones sencillas; por otro lado, (Alfaro et al., 2021) informan que Colombia cuenta con 21 áreas geotérmicas con un potencial de 1170,2 MWe para generación eléctrica y calor geotermal acumulado de 138,6 EJ, que equivalen al 7% de la capacidad nacional eléctrica instalada; en tanto que, (Mijnlieff, 2020) informa que el subsuelo holandés ofrece un amplio potencial geotérmico para uso directo, caracterizado por campos de baja entalpía hidrotermales conductivas y acuíferos sedimentarios calientes, y que los depósitos geotérmicos dependen de la falla y permeabilidad de la fractura relacionadas a las rocas al subsuelo.

El calor geotermal se utiliza para calefaccionar viviendas, edificios; en procesos industriales como en las fábricas de celulosa, papel, conservas, harinas de pescado; para el secado de frutas y vegetales en general; para calefacción de invernaderos, establos y criaderos, en piscicultura, para calentamiento de suelos de cultivos en zonas frías, para derretir la nieve de los caminos, en estas aplicaciones es necesario que la temperatura del agua o del vapor sea la adecuada, los países que utilizan el calor geotérmico para procesos industriales, agrícolas y de ambientación son Islandia, Rusia, Hungría, Nueva Zelanda y otros (IEG, 1987), (Tarcan & Gemici, 2003). Con el vapor geotermal de media y alta temperatura se genera energía eléctrica mediante instalaciones similares a las máquinas térmicas convencionales, la diferencia radica en el origen del vapor que mueve las turbinas que alimentan el generador eléctrico, en una turbina convencional el vapor se obtiene quemando derivados de petróleo, gas o carbón, mientras que en una planta geotérmica no es necesario gastar combustible pues es provisto directamente por el campo geotérmico, en general el vapor viene mezclado con agua y ésta contiene sales, por lo que es necesario separar el vapor del agua para que pueda ser derivado a las turbinas (Lapus & Neira, 2016), (Tarcan & Gemici, 2003).

Por otro lado, (Prajapati et al., 2021) indican que el agua es una de las necesidades fundamentales de cada ser vivo, pero que su calidad y cantidad para consumo están disminuyendo debido a diferentes contaminaciones y cambios ambientales y que la energía geotermia de baja entalpía puede ser usada para la desalinización del agua de mar, que no depende de las condiciones climáticas y es de flujo de calor constante; que la energía geotermia es una fuente factible, sostenible, amigable con el medio ambiente, ecológica, puede usarse en procesos de desalinización térmica, como medio de almacenamiento, en climatización de ambientes y para remover sólidos disueltos de alta concentración presentes en cuerpos de agua (Gude, 2016), (Carro Pérez et al., 2018); asimismo (Bundschuh et al., 2015) establecen que la geotermia es una buena opción superior a la solar al disponer de calor a bajo costo y de flujo constante, que los sistemas híbridos solar-geotérmicos pueden ser los adecuados en zonas donde las fuentes están disponibles.

2.2.3 Destilador solar

Es un sistema que permite destilar agua para consumo humano a partir del agua de mar, salobres, contaminadas química y biológicamente y también para producir cloruro de sodio o sal (Fouillac & Michard, 1981), según (Polo & Mamani, 2013) usan como fuente energética la energía solar, la cual es limpia, descentralizada, renovable, gratuita y de alto potencial energético regional y nacional; que el agua destilada se obtiene por el principio físico de evaporación-condensación, en un ambiente cerrado con un cobertor transparente (Torchia Núñez et al., 2014), (Torres & Mejía, 2016). En tanto, que (Arregín & Dominguez, 2000) indican que la irradiancia solar incidente llega al fondo del depósito de color negro, que la adsorbe, calentando el agua a una determinada temperatura y evaporándola desde la superficie, generando un flujo de convección natural de aire húmedo que se produce dentro del destilador, debido a la diferencia de temperaturas entre la salmuera caliente y la cubierta de vidrio; para luego condensarse en la superficie interior del cobertor y deslizarse en gotas por gravedad sobre la superficie inclinada hacia un canal colector colocada en las paredes laterales del destilador, también lo indican (Santos, 2009), (De Paul, 2001). Por otro lado, (Torchia et al., 2014) reportan que las partes de un destilador solar de dos vertientes, está compuesto por el depósito colocado en el fondo (tina o cubeta) para depositar el agua salobre que se inyecta desde el exterior, el cobertor transparente puede ser de vidrio o plástico, las canaletas para la recepción del agua destilada, y a cámara de evaporación del agua.

2.2.4 La destilación solar

Se presenta como una alternativa atractiva para producir agua potable, su uso ha recibido considerable atención a partir de 1960 en muchos países y es de esperar que este interés aumente rápidamente en los próximos años (OMS, 2006),(Lobos, 2015). En Colombia, por ejemplo, los destiladores solares se vienen estudiando como medio de purificar agua para consumo humano en regiones con elevados los índices de mortalidad debidos a enfermedades de origen hídrico (Carbajal & Gonzales, 2012); sin embargo, (Reyes et al., 2016), indican que la contaminación de los recursos hídricos, suelos y aire por metales pesados y metaloides, plantea una de las más severas problemáticas que comprometen la seguridad alimentaria y salud pública a nivel global y local. En tanto que, (Dsilva et al., 2016) establecen que entre las tecnologías de desalinización los destiladores solares son fácilmente asequibles, de poco mantenimiento y producción limitada, pueden ser activos y pasivos, con efecto único múltiple y con diversas modificaciones para mejorar la producción de agua destilada. En la India, Egipto, Irán y Jordania han desarrollado y evaluado experimentalmente destiladores solares integrados a colectores solares que aumentan el rendimiento en la producción de agua dulce en el rango de (2,9 – 53,2) l/m²/día, y mejoras en el rendimiento entre (7,67 - 76,43) %, pero que son antieconómicos para familias de ingresos medios y bajos (Sathyamurthy et al., 2017).

2.2.5 Balance energético y masa en un destilador solar

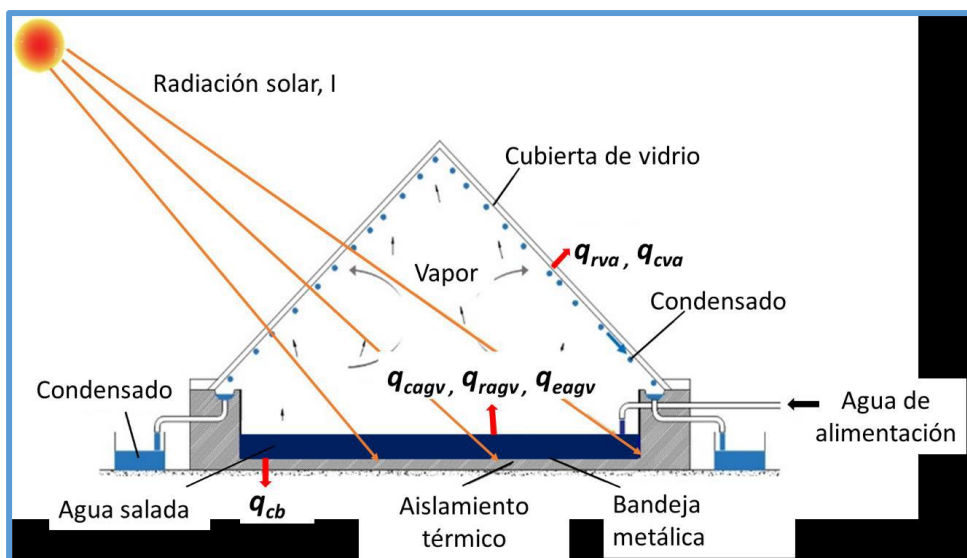
En todos los destiladores solares cualquiera sea el tipo, modelo en el proceso de calentamiento, evaporación y condensación del agua se manifiestan los tres procesos fundamentales de transferencia de calor: conducción, convección natural y radiación, acumulación en los materiales utilizados en su construcción y de masa, considerando que se requiere energía para el calentamiento y la evaporación del agua y se disipa en el cobertor durante la condensación del vapor por cambio de fase y a través del agua destilada que produce el sistema; por tanto, cuando se desea caracterizar su funcionamiento es necesario realizar un balance de energía y de masa (Torres & Mejía, 2016). Existen modelos matemáticos en base a balances de energía de sus principales componentes, considerando como fuente energética la energía solar (Dúcculli et al.,2016), (Ramos & Briozzo, 2010), (Figura 6).

Para realizar el planteamiento del modelo se hacen las siguientes consideraciones: no existen fugas de vapor en el equipo, las superficies del agua y la cubierta se consideran

paralelas, la viscosidad, conductividad, calor de vaporización se consideran constantes, se considera que no existen gradientes de temperatura en la dirección vertical ni horizontal en la bandeja, el agua y la cubierta, la temperatura de la cubierta de vidrio externa e interna son aproximadamente las mismas, las características ópticas de transmitancia, reflectancia, absorptancia y emitancia se suponen constantes, la irradiancia solar se simula por una función sinusoidal (Fonseca, & Miranda, 2011), (Romero & Domínguez, 2013).

Figura 6

Esquema de un destilador solar de doble pendiente, mostrando sus partes y los diferentes procesos de transferencia de calor.



Para la modelación del comportamiento térmico del destilador solar es necesario conocer la temperatura en las tres regiones del equipo. A partir de la diferencia de temperaturas entre el agua y la cubierta es posible calcular el volumen de agua destilada. Para ello se parte del balance de energía en cada una de ellas, es decir en la bandeja, el agua a destilar y la cubierta (Caguao, 2013). A partir de las consideraciones anteriores se establecen las siguientes ecuaciones de balance de energía:

Balance de energía en la cubierta

La variación de energía de la cubierta en un intervalo de tiempo determinado está dada por la diferencia entre la energía captada y la energía entregada por ella en el mismo intervalo de tiempo y se expresa por:

$$M_g * C_{pg} * (dT_g/dt) = \tau_1 H_s + h_1 * (T_w - T_g) - h_2 * (T_g - T_a) \quad (1)$$

Balance de energía en el agua

La variación de energía de la masa de agua a destilar en un intervalo de tiempo determinado está dada por la diferencia entre la energía captada y la energía entregada por ella en el mismo intervalo de tiempo y se puede expresar por:

$$M_w * C_{pv} * dT_w/dt = \tau_2 H_s + h_s * (T_b - T_w) - h_1 * (T_w - T_g) \quad (2)$$

Balance de energía en la bandeja

La variación de energía del recipiente que contiene el agua a destilar en un intervalo de tiempo determinado está dada por la diferencia entre la energía captada y la energía entregada por él en el mismo intervalo de tiempo y se puede expresar por:

$$M_b * C_{pb} * dT_b/dt = \tau_3 * H_s - h_s * (T_b - T_w) - h_4 * (T_b - T_a) \quad (3)$$

Donde la radiación solar se calcula con:

$$H_s = (\pi/2T_s) * H_t * \text{sen}(\theta / t_s)t \quad (4)$$

Resolviendo las ecuaciones diferenciales indicadas, se obtiene que la temperatura en la superficie de cobertor es dada por:

$$T_g(t) = t_a(t) + (V_1 * e^{v_0t} + V_2 * e^{v_01t} + V_3 * e^{v_02t} - V_4 * \text{Cos}(V_5t) + V_5 * \text{Sin}(V_6t) \quad (5)$$

La temperatura del agua en la bandeja:

$$T_w(t) = t_a(t) + (A_{g1} * e^{\dot{A}_{g0}t} + A_{g2} * e^{-A_{g01}t} + A_{g3} * e^{-A_{g02}t} - A_{g4} * \text{Cos}(A_{g5}t) + A_{g5} * \text{Sin} A_{g6}t \quad (6)$$

La temperatura de la bandeja:

$$T_b(t) = t_a(t) + (B_{a1} * e^{-Ba0t} + B_{a2} * e^{-Ba01t} + B_{a3} * e^{-Ba02t} + B_{a4} * \text{Cos}(B_{a6}t) + B_{a5} * \text{Sin}(B_{6}t)) \quad (7)$$

El volumen de agua destilada:

$$V = A_1 * h_{ev} * (T_a - T_w) / \rho_a * L_v \quad (8)$$

Donde:

A_1 : área del destilador (m^2), h_{ev} : coeficiente de transferencia de calor por evaporación del agua ($kJ/h m^2 \text{ } ^\circ C$), ρ_a : densidad del agua (kg/m^3), L_v : calor latente de vaporización del agua (kJ/Kg) a temperatura máxima alcanzada, M_g , M_w , M_b : masa del vidrio, del agua y de la bandeja respectivamente (Kg) C_{pg} , C_{pw} , C_{pb} : calor específico del vidrio, del agua y de la bandeja respectivamente ($kJ/kg K$) T_g , T_w , T_b : temperatura del vidrio, del agua y de la bandeja respectivamente ($^\circ C$). τ_1 : coeficiente de absorción del vidrio τ_2 : fracción de energía solar incidente que es absorbida por el agua τ_3 : fracción de energía solar incidente que es absorbida por la bandeja, H_s : radiación solar incidente en el vidrio (kJ/m^2), h_1 : coeficiente de transferencia de calor agua vidrio ($kJ/h m^2 K$), h_2 : coeficiente de transferencia de calor vidrio ambiente ($kJ/h m^2 K$), h_3 : coeficiente de transferencia de calor bandeja agua ($kJ/h m^2 K$), h_4 : coeficiente de transferencia de calor bandeja ambiente ($kJ/h m^2 K$), H_i : radiación solar diaria (kJ/m^2), T_a : temperatura ambiente ($^\circ C$), t : tiempo (h), T_s : duración del día solar, (h): α , β , σ , ξ , φ , α_1 , β_1 , σ_1 , ξ_1 , φ_1 , α_2 , β_2 , σ_2 , ξ_2 , φ_2 coeficientes calculados por el método de fracciones simples para calcular la transformada de cada término de la solución. p , q : coeficientes obtenidos de agrupar las variables del modelo de entrada (Caguao, 2013)

2.2.6 Tipos de destiladores solares

Ante el incremento de la producción de agua fresca para la población y el desarrollo industrial, estos sistemas cada día se vienen incrementando, para cubrir esta demanda, habiéndose desarrollado muchas tecnologías, con sistemas que requieren bajo mantenimiento y fácilmente asequibles, pueden ser activos y pasivos, con efecto simples y múltiples, con reflectores, tanque de almacenamiento, ventiladores, colectores, condensadores y mecanismos para optimizar la transferencia de calor y masa (Dsilva et al.,2016). Según la geometría elegida para el cobertor pueden ser destiladores triangulares según lo establecido por (Rubio et al., 2002),(Fath & Hassabou, 2003); hemisféricos analizados por (Khawaji, & Wie, 2008); los de

pendientes múltiples (Dsilva et al., 2016), (Castillo, 2008), (Dev, & Tiwari, 2011); verticales estudiados por ((Minasian & Karaghoul, 1992), (Boukar & Harmim, 2004).

Métodos y tipo de energía usada en la destilación

Existen diferentes métodos de destilación para a la obtención de agua destilada, según sea el tipo de energía térmica o mecánica utilizada para el proceso de evaporación o la filtración elegida (Trieb, 2005), (Moser et al., 2010), (Tabla 4).

Tabla 4

Métodos de destilación existentes según el proceso físico escogido.

Obtención	Energía	Proceso	Método
Agua destilada del agua de mar	Térmica	Evaporación	Destilación súbita (flash)
			Destilación multiefecto
			Termocompresión de vapor
	Mecánica	Filtración y Evaporación	Destilación solar
			Destilación con membranas
Mecánica	Evaporación	Compresión mecánica vapor	
		Filtración	Ósmosis Inversa

Tomado de (Trieb, 2005).

Por otro lado, (Aburideh et al., 2012), muestran un análisis comparativo de las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos métodos tecnológicamente avanzados para la producción de agua desalada, desde el punto de vista de consumo energético por kilogramo de agua producida, capacidad de producción, costos de las plantas, entre otros aspectos importantes, afirmando que la ósmosis inversa es en conjunto la tecnología más favorable en el mundo, en base a su mejor precio de obtención del agua, por su volumen diario y su fiabilidad, tan sólo que la calidad del agua es de menor calidad que el resto de las tecnologías, requiere de un segundo paso por membranas para reducir la concentración de sal; por ello es necesario que se requiere investigar destiladores geotérmicos-solares para producir un mayor volumen de agua potable para consumo humano libre de contaminantes metálicos y bacteriológicos para el

consumo humano en lugares que presenten problemas de contaminación natural y antropogénicas de sus fuentes de agua (Chaichan & Kazem, 2015) (Tabla 5).

Tabla 5

Valoración de diferentes características deseables para los métodos de destilación de agua existentes en el mercado.

Característica	MSF	MED-TVC	CV	OI
Tipo energía	TÉRMICA	TÉRMICA	ELÉCTRICA	ELÉCTRICA
Consumo energético (kJ/kg)	alto (>200)	alto/medio (150-200)	medio (100-150)	bajo (<80)
Coste instalaciones	alto	alto/medio	alto	medio
Capacidad producción (m³ /día)	alta (>50.000)	media (< 20.000)	baja (<5.000)	alta (>50.000)
Posibilidad ampliación	difícil	difícil	difícil	fácil
Fiabilidad de operación	alta	media	baja	alta
Destilación agua de mar	sí	sí	sí	sí
Calidad agua destilada (ppm)	alta (< 50)	alta (< 50)	alta (< 50)	media (300-500)
Superficie terreno requerida para la instalación	mucha	media	poca	poca

Tomado de (Trieb, 2005).

2.2.7 Aguas geotermales

Las aguas geotermales son aguas que brotan del suelo de manera natural y a temperatura que supera los 5 °C, con cierta cantidad de minerales (Vargas et al.,2012). De acuerdo a los minerales que incluyen, las aguas termales pueden clasificarse como aguas sulfuradas (con elevado índice de azufre), aguas cloruradas (que incluyen cloro) y aguas ferruginosas (tienen hierro), entre otras. En cuanto a su temperatura, existen las aguas de muy baja entalpía (5 - 25) °C, de baja entalpía (25 – 100) °C, de media entalpía (100 – 150) °C y de alta entalpía > a 150 °C (Gamboa et al., 2015).

En el caso de zona altoandina de la región Tacna, en sus seis campos geotermales las aguas emergen a la superficie con alto contenido de boro, azufre, arsénico, hierro, otros, denominadas aguas geotermales contaminadas naturalmente (Cruz et al., 2014).

2.2.8 Toxicidad del arsénico

Considerada la sustancia más nociva para el organismo humano y los animales, el máximo nivel tolerable en el ganado es de 50 mg/Kg de tipo inorgánico y de 100 mg/Kg del tipo orgánico, el As (III) es más tóxico que el As (IV), la intoxicación humana se produce por inhalación o ingestión del trióxido de arsénico (As_2O_3), los síntomas son fuertes desórdenes gastrointestinales, calambres, y colapso circulatorio (Hu B. et al., 2017).

La intoxicación crónica puede ser causada por ingesta de alimentos y agua que contienen arseniuros, o por exposición laboral al inhalar durante mucho tiempo polvo en el lugar de trabajo, produciendo pigmentación en la piel, lesiones en la médula ósea, sangre, hígado, vías respiratorias, y sistema nervioso central, además puede generar bronquitis; cáncer de esófago, laringe, pulmón y vejiga; así como también enfermedades vasculares (Castro de Esparza, 2006). Suele encontrarse en las fuentes de agua potable a causa de la contaminación del agua por los procesos industriales, uso de pesticidas y por procesos naturales (Litter et al., 2012).

Asimismo, Delgado Quezada et al., (2020) indican que en Nicaragua 144 comunidades distribuidas en 12 departamentos y una región autónoma están impactadas por el arsénico, 55700 personas expuestas al agua potable con concentraciones entre (810-1320) $\mu\text{g/L}$ y para aguas subterráneas entre (0,10-1320) $\mu\text{g/L}$; mientras que, (Litter et al., 2019) informan que en Argentina la presencia de arsénico en aguas subterráneas afectan a la salud humana, las concentraciones oscilan entre (11,4-1660) $\mu\text{g/L}$, afectando a 6 millones de personas; en tanto que, (Bundschuh et al., 2021) indican que la mortalidad y morbilidad siguen aumentando relacionadas al consumo de altas concentraciones de arsénico provenientes de diferentes fuentes a pesar de varias décadas de esfuerzos para reducir la exposición al arsénico, las que pueden causar daño pulmonar, al estómago, riñones, hígado, corazón y sistema nervioso y hasta la muerte al ser corrosivo, como también lesiones a la piel o daños a los ojos, y que una exposición prolongada puede provocar el desarrollo del cáncer. Asimismo, (Corroto et al., 2021) reportan que existen numerosas tecnologías para remover arsénico a gran escala del agua con eficiencias entre el (70-99)%, como la coagulación, flotación, precipitación como las más usadas; con

sistemas de caudales bajos, como la oxidación, coprecipitación, adsorción, intercambio iónico, procesos de membrana con ósmosis inversa, y que cada proceso genera residuos con alta concentración de arsénico que genera impactos ambientales, y que la fitorremediación es de bajo costo y ambientalmente aceptables, al igual que la biosorción, las cuales son llamadas tecnologías emergentes o verdes.

2.2.9 Eficiencia de destiladores solares (SS)

La eficiencia de los destiladores solares se define como la razón entre la energía necesaria requerida para evaporar un litro o kilogramo de agua a temperatura máxima del agua en la tina o cubeta y la irradiancia solar incidente sobre la superficie del destilador solar, se expresa en % (Ugwuoke et al., 2006). Está en función de la potencia de la irradiancia solar incidente, la temperatura ambiente, volumen de agua a procesar, así como en la forma y la característica del destilador. En líneas generales, se estiman que los porcentajes de aprovechamiento útil de la energía solar para destilar agua rondan entre el 25 y el 50% para los modelos descritos. Estos valores traducidos en cifras cotidianas significan que es posible obtener entre 3 y 5 litros diarios por metro cuadrado de superficie de colector del destilador, llamado factor de producción, en días soleados. Estos niveles producción hacen perfectamente viable el uso de agua destilada solar para consumo humano, sanitarios e industriales con instalaciones de suficiente tamaño (Dsilva et al., 2016). Se calcula con la siguiente ecuación (Polo & Mamani, 2013).

$$\eta = m_p * L / R_s * A \quad (9)$$

Donde:

m_p : volumen de agua destilada en la unidad de tiempo (m^3/h o kg/h), L : calor latente de vaporización del agua a temperatura máxima alcanzada en la cubeta (KJ/kg), R_s : Irradiancia solar sobre el destilado (W/m^2), A : área del captador del destilador (m^2) o del fondo de la cubeta o tina.

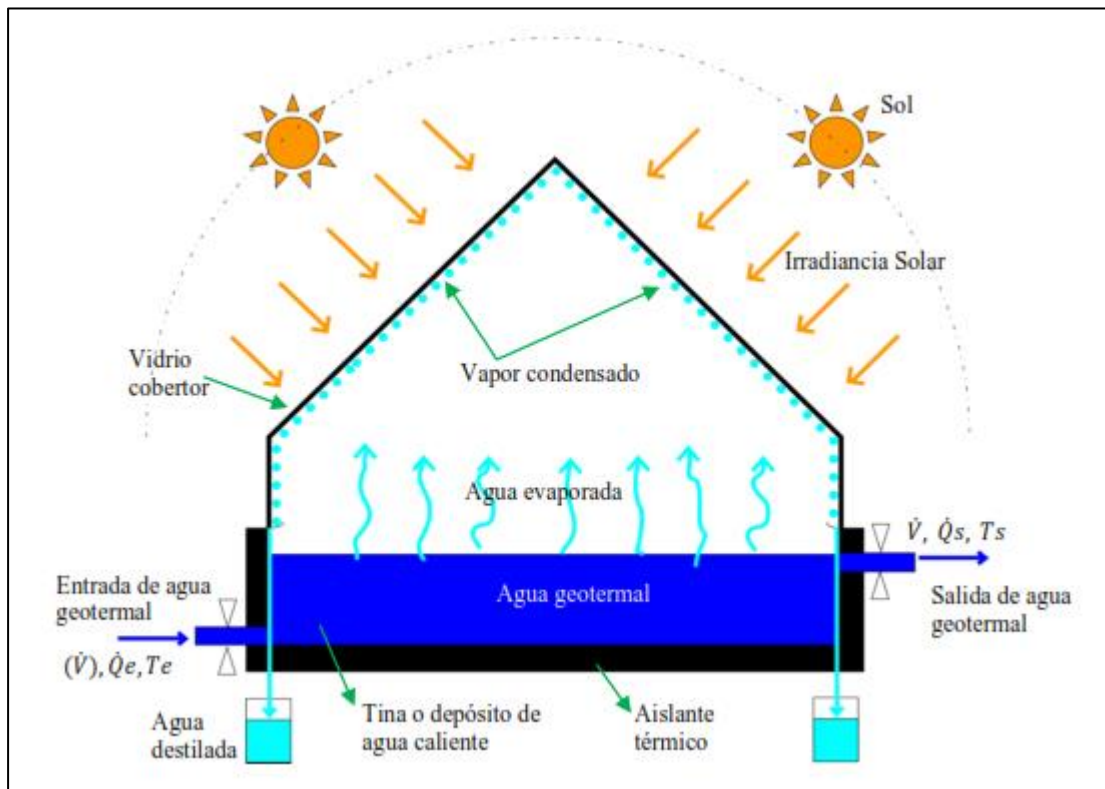
2.2.10 Destilador geotérmico-solar (DGS) de doble pendiente (SOGÉ)

Es un sistema híbrido que funciona con fuentes energéticas geotérmica y solar, se puede utilizar para descontaminar aguas contaminadas biológicamente o servidas (Barroso,2016), (Álvarez, 2017), también naturales y salobres con alto contenido de metales pesados y metaloides (Lund, 2007). Utiliza como fuentes energéticas la irradiancia solar global y la geotérmica de baja entalpía en lugares que cuentan con dichos recursos, el funcionamiento es

similar a un destilador solar, produce agua destilada durante las 24 horas del día y durante años, en días nublados, semi nublados y despejados (Santos, 2009), (De Paul, 2001), (Voropoulos et al., 2003). En el día funciona con el aporte energético de la irradiancia solar incidente y el calor sensible del agua geotermal, y durante la noche sólo con el aporte energético geotermal. Funciona en forma ininterrumpida las 24 horas del día independientemente de las condiciones meteorológicas, toda vez que el flujo volumétrico de agua caliente geotermal de ingreso al destilador a una determinada temperatura, proporciona la energía calorífica sensible necesaria para evaporar el agua geotermal dentro del destilador (Figura 7). A diferencia de los destiladores solares deben de tener una tubería con llave de paso para el control de la entrada del agua geotermal y una de salida, considerando que funcionan a determinados flujos volumétrico constante durante todo el proceso de destilación, además de tubería o manguera para la conducción del agua caliente desde la fuente geotermal al DGS y el desagüe correspondiente para limpieza y mantenimiento.

Figura 7

Esquema del destilador geotérmico-solar de doble vertiente, diseñado, construido y evaluado experimentalmente.



2.2.11 Eficiencia del destilador geotérmico-solar (SOGE)

Es la relación entre el calor latente de vaporización del agua a la temperatura del agua en la cubeta, y el calor sensible suministrado por el flujo volumétrico de agua geotermal que ingresa al destilador, más la irradiancia solar incidente sobre el destilador (durante el día), se cuantifica con la siguiente ecuación:

$$\eta = M_{\text{agua}} * Lv / [m * C * (T_e - T_s) + R_s * A] \quad (10)$$

Donde:

M_{agua} : masa o volumen de agua destilada (Kg), Lv : calor latente de vaporización del agua a la temperatura en la cubeta (cal/g), m : flujo volumétrico de ingreso del agua al destilador (m^3/s), C : calor específico del agua a la temperatura promedio $T_p = (T_e + T_s)/2$ (cal/g°C), T_e : Temperatura de ingreso del agua geotermal al destilador (°C), T_s : Temperatura de salida del agua geotermal del destilador geotérmico-solar (°C), R_s : irradiancia solar incidente sobre destilador (W/m^2) y A : área de la superficie del fondo de la cubeta. Durante la noche sólo se considera el aporte geotermal.

2.2.12 Eficiencia de destiladores geotérmicos (SG)

Es la relación entre el calor latente de vaporización del agua a la temperatura del agua en la cubeta, y el calor sensible suministrado por el flujo volumétrico de agua geotermal que ingresa al destilador (sin irradiancia solar incidente), se cuantifica con la siguiente ecuación:

$$\eta = M_{\text{agua}} * Lv / m * C * (T_e - T_s) \quad (10)$$

Donde:

M_{agua} : masa o volumen de agua destilada (Kg), Lv : calor latente de vaporización del agua a temperatura en la cubeta (cal/g), m : flujo volumétrico de ingreso de agua al destilador (m^3/s), C : calor específico del agua a la temperatura promedio $T_p = (T_e + T_s)/2$ (cal/g°C), T_e , T_s : Temperaturas de ingreso y salida del agua geotermal al destilador (°C), respectivamente. Aplicable para procesos de destilación durante las noches.

El calor latente de vaporización (L_v) del agua a temperatura en la cubeta en (cal/g) se determina con la ecuación:

$$L_v = 2503,94 - 2,4515T_w \quad (11)$$

Donde: T_w es la temperatura del agua en la cubeta, válida para ($10 < T_w < 100$)°C

2.3 Definición de términos

a) *Irradiancia solar directa*

Es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección, este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan (Duffie & Beckman, 2003).

b) *Irradiancia solar difusa*

Es la proveniente del cielo como consecuencia de las reflexiones en las nubes la cual atraviesa la atmósfera, se refleja en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc., las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque sólo ven la mitad (Chasseriaux, 1990).

c) *Irradiancia solar global*

Es la suma de las irradiancias directa y difusa. En un día despejado, con cielo limpio, la irradiancia directa es preponderante sobre la difusa, en un día nublado no existe irradiancia directa y la totalidad de la irradiancia es difusa. Los distintos tipos de colectores y sistemas solares aprovechan de forma distinta la irradiancia solar. Los colectores solares planos, los destiladores solares, captan la irradiancia total (directa + difusa), sin embargo, los colectores de concentración sólo captan y funcionan con la irradiancia directa (Breeze et al., 2009), (Duffie & Beckman, 2003).

d) *Aguas naturales contaminadas con metales*

Son aguas que tienen contenidos de metales y metaloides por encima de los límites máximos permisibles (LMP) que son causantes de muchas enfermedades en la salud humana y

ecosistemas, principalmente provienen de zonas volcánicas, y se caracterizan por sus altos contenidos de arsénico, boro, fierro, litio, azufre, otros, para ser potable y consumo humano e industrial se requiere extraer esos contaminantes por diferentes procesos, físicos, químicos, biológicos o combinados por debajo de los LMP, para lo que se requiere energía en cualesquiera de sus formas (Vargas et al.,2012).

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo y diseño de la investigación

El tipo de investigación es explicativa, porque se ha encontrado la relación causa efecto entre las variables dependientes como la concentración final de arsénico en el agua destilada y el volumen de agua destilada y las independientes constituidas por las tres formas de funcionamiento del DGS.

El diseño de la investigación es experimental-cuantitativo, considerando que la evaluación experimental del DGS se ha realizado en el campo geotérmico de Borateras, anexo de Chillicollpa, distrito de Ticaco, provincia de Tarata, región Tacna; diseñado para que funcione bajo tres formas de diferentes usando híbridamente dos fuentes energéticas renovables o por separado como la energía solar y la geotérmica de baja entalpía cuantificando las variables dependientes.

3.2 Población y muestra del estudio

3.2.1 Población de estudio

La población de estudio está compuesta por las 40 fuentes de aguas geotermales con alto contenido de arsénico presentes en el campo geotérmico de Borateras, anexo Chillicollpa, distrito de Ticaco, provincia de Tarata, región Tacna, elegida por conveniencia y logística de accesibilidad local, cuyas aguas discurren hacia la cuenca hídrica del río Maure, la cual es consumida por la población altoandina fronteriza de Perú, Chile y Bolivia.

3.2.2 Muestra de estudio

Para cuantificar el volumen de agua destilada, están constituidas por los volúmenes de agua natural geotermal con contenido inicial de arsénico tomada de la fuente, y del agua destilada cada hora y diario con el destilador geotérmico-solar bajo las tres formas de funcionamiento: sólo con energía solar (SS), sólo con energía geotérmica (SG) y con energía solar+geotermal (SOGÉ).

Para determinar la concentración final de arsénico presente en el agua destilada bajo las tres formas de funcionamiento, las muestras fueron analizadas en el Laboratorio acreditado de Ensayos y Control de la Calidad de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas de la Universidad Católica Santa María de Arequipa, bajo la norma EPA Method 200.7 (Determinación de metales totales), se colectó una muestra de la fuente geotermal a 80 °C, encontrando una concentración inicial de 9,2 mg/L, para que el agua circule por el DGS por gravedad sin usar bomba eléctrica es importante que el terreno donde funcione el destilador presente una pendiente adecuada.

3.3 Diseño y construcción del destilador geotérmico-solar (DGS)

Diseñado sobre modelos de los diferentes tipos de destiladores solares encontrados en las referencias sobre la temática, de dimensiones que permita el fácil traslado a la zona altoandina, con tuberías de entrada y salida del agua geotermal que circule a flujo volumétrico constante y a temperaturas entre 20 a 90 °C, con materiales que resistan los cambios de temperatura, las ráfagas de viento, granizo propio de la zona altoandina de la región Tacna, y no se oxiden en contacto con el agua geotermal que contiene muchos elementos metálicos. Preparado para que funcione bajo tres formas: solo solar (SS) en el día, solo geotérmico (SG) las 24 horas, y geotérmico-solar (SOGE) día y noche (Figuras 11, 12).

Construido con materiales adquiridos en la ciudad de Tacna a través de una carpintería metálica local para la soldadura eléctrica de las partes correspondientes, que cumplan con las características de resistencia indicadas en el diseño, no permitan la fuga de vapor desde el interior del destilador y la filtración de humedad, agua y polvo desde el medio ambiente exterior, se han utilizado planchas de acero inoxidable para la cubeta o tina, tubos de acero inoxidable para la entrada y salida del agua geotermal, plancha de hierro galvanizado para la carcasa, vidrio transparente en los cobertores, estructura metálica de hierro galvanizado para soporte de cobertores, y canaletas de PVC para captación del agua destilada en parte inferior de los cobertores; con adecuación para la instalación de sensores de temperatura y humedad relativa dentro de la cámara de vaporización, y con accesorios para medir manualmente el volumen de agua destilada.

Pre-evaluado experimentalmente en el Laboratorio de Energías Renovables de la Escuela Profesional de Física Aplicada y en el Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT) de la Facultad de Ciencias de la UNJBG (Figura 8).

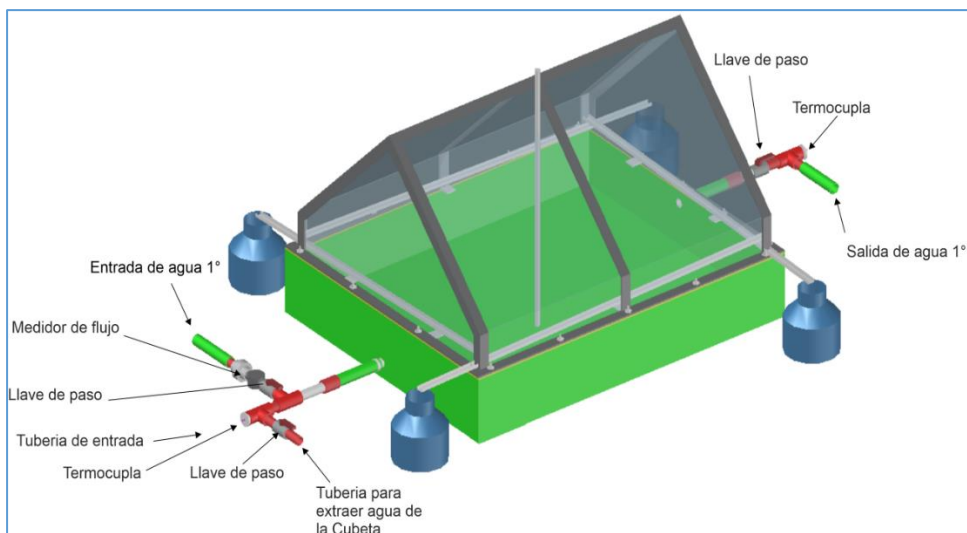
Figura 8

Vista del destilador geotérmico-solar (DGS) mostrando dimensiones y materiales utilizados en la construcción.



Figura 9

Esquema del DGS diseñado para que funcione bajo tres formas diferentes con energía geotermia de bajo entalpía y solar global.



El agua geotermal desde la fuente a flujo volumétrico constante es conducida por gravedad hacia la entrada del destilador a través de tuberías de PVC y manguera de 5 m de longitud de 1" de diámetro, aprovechando el gradiente topográfico del lugar elegido, y sale por el lado opuesto, vertiéndose al medio ambiente. La entrada y salida del agua geotermal se

controlan con llaves de paso de 1", en la entrada se ha colocado en paralelo una llave de paso para desaguar por gravedad el agua residual en la cubeta (Figura 10).

Figura 10

Vista integral del DGS, mostrando el sistema hidráulico de ingreso y salida del agua geotermal.



Figura 11

Arreglo experimental para funcionamiento solo con aporte geotérmico (SG).



Figura 12

Vista del destilador geotérmico-solar en funcionamiento solo geotermal (SG) durante la noche.

**3.4 Reducción de la concentración de arsénico****a) Frecuencia y horario de muestreo**

Las muestras de volúmenes de agua destilada (ml) para el análisis químico correspondiente, se colectaron manualmente, cada hora durante el día y la noche, para cada una de las tres formas de funcionamiento del destilador.

b) Equipos e instrumentos

Se recoge muestras de agua destilada cada hora en depósitos de plástico de PETs, del cual se separan cuatro muestras en depósitos de un litro para cada una de las formas de funcionamiento del destilador, a efectos del posterior análisis físico-químico en el laboratorio especializado.

c) Prueba estadística

Para comprobar los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de las varianzas y para determinar las diferencias en la reducción de arsénico (mg/L) bajo las tres formas de funcionamiento del DGS, los datos obtenidos se analizaron con el programa ANDEVA, y para el contraste de la hipótesis se usó la prueba de contraste Tukey.

3.5 Determinación del volumen de agua destilada

a) *Frecuencia y horario de muestreo*

Con los depósitos colocados en los cuatro laterales del DGS, se recolecta el agua destilada cada hora, medido con una probeta graduada en mililitros, identificados como V1, V2, V3, V4, donde V1: volumen condensado en el cobertor inclinado orientado al Este, V2: volumen condensado en el cobertor vertical orientado al Norte, V3: volumen condensado en el cobertor inclinado orientado al Oeste, y V4: volumen condensado por el cobertor vertical orientado al Sur, para cada una de las tres formas de funcionamiento del destilador.

El DGS se instaló a una altura de 5 cm de altura sobre el suelo, bajo soporte de listones de madera a efectos de protegerlo de la humedad natural del suelo y la proveniente de las lluvias, en tanto que la entrada y salida del agua geotermal orientadas en la dirección sur-norte.

b) *Equipos, instrumentos e insumos*

Para la colección del agua destilada se ha utilizado probetas graduadas en mililitros (ml) de vidrio, depósitos de 5 y 20 litros de material PETs, para cuantificar el volumen de agua destilada horaria en cada una de las cuatro superficies cobertoras de vidrio y el total diario acumulado (V_{acum}) para cada una de las formas de funcionamiento indicadas: solo con energía solar (SS) (durante el día); con energía solar+geotermia (SOGE) (durante el día y noche: 24 horas); con energía geotérmica (SG) (24 horas), bajo las condiciones meteorológicas de la zona altoandina (Figura 13).

Figura 13

Vistas del arreglo hidráulico para el ingreso y salida del agua geotermal del DGS



Para las tres formas de funcionamiento, el volumen del agua geotermal en la cubeta es de 96 litros, el que permanece constante durante el proceso de destilación, pero renovándose continuamente a razón de 7.3 L/min.

c) Prueba estadística

Para comprobar los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de las varianzas y para determinar las diferencias del volumen de agua destilada (ml) bajo las tres formas de funcionamiento del DGS, los datos obtenidos se analizaron con el programa ANDEVA, y para el contraste de la hipótesis se usó la prueba de contraste Tukey.

5.3 Caracterización térmica

Para caracterizar térmicamente el sistema se ha usado siete termocuplas de Cromel-Alumel previamente calibradas y adaptadas al sistema, conectadas a una memoria de registro automático de datos, a efectos de monitorear temperaturas en diferentes partes del sistema, como la de entrada del agua caliente (T_e), del agua en la cubeta (T_1), del vapor de agua dentro cámara de vapor (T_2), de la superficie interna (T_3) y externa del cobertor de vidrio (T_4), de salida del agua (T_s), y la temperatura del agua de la fuente geotermal (T_f) que se registran automáticamente con tres datalogger marca HOBO de cuatro canales cada uno.

La irradiancia solar global incidente (R) sobre superficie horizontal, velocidad (v_v) y dirección del viento (dir), presión atmosférica (P_{atm}), precipitación pluvial (P) se han monitoreado con una estación meteorológica automatizada programable marca HOBO, los datos registrados y almacenados se descargan diariamente a una computadora portátil ThimPad Core i7, 1Gb RAM para el tratamiento y procesamiento correspondiente (Figuras 14,15).

Adicionalmente, se utilizaron dos sondas digitales para medir la humedad relativa (HR_i) y la temperatura del vapor de agua (T_i) en el interior del destilador, un flujómetro digital de 1" de diámetro colocado en la entrada de agua caliente (V), y dos sensores de Pt100 de inmersión para medir las temperaturas en la superficie interna (T_{iv}) y externa (T_{ev}) del vidrio cobertor, realizado con un sistema de adquisición y almacenamiento automático de datos de 24 canales, construido localmente con hardware libre Arduino, bajo los alcances de la inteligencia artificial (Figuras 16,17).

Tanto que los parámetros meteorológicos, térmicos, flujo volumétrico y de humedad se han registrados automáticamente cada 15 segundos para cada forma de funcionamiento del DGS.

Figura 14

Vista panorámica que muestra la estación meteorológica de monitoreo de datos, fuente de abastecimiento energético con dos paneles fotovoltaico y accesorios.



Figura 15

Diagrama esquemático de la evaluación experimental del destilador geotérmico solar, mostrando los puntos de monitoreo térmico y parámetros meteorológicos.

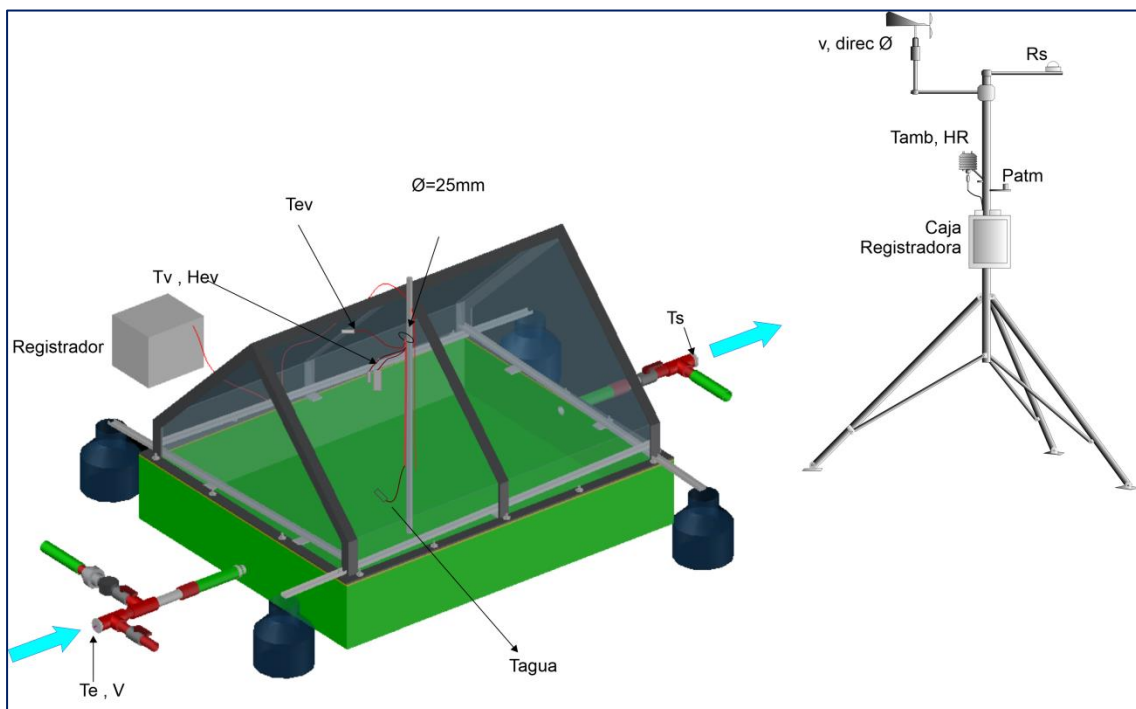


Figura 16

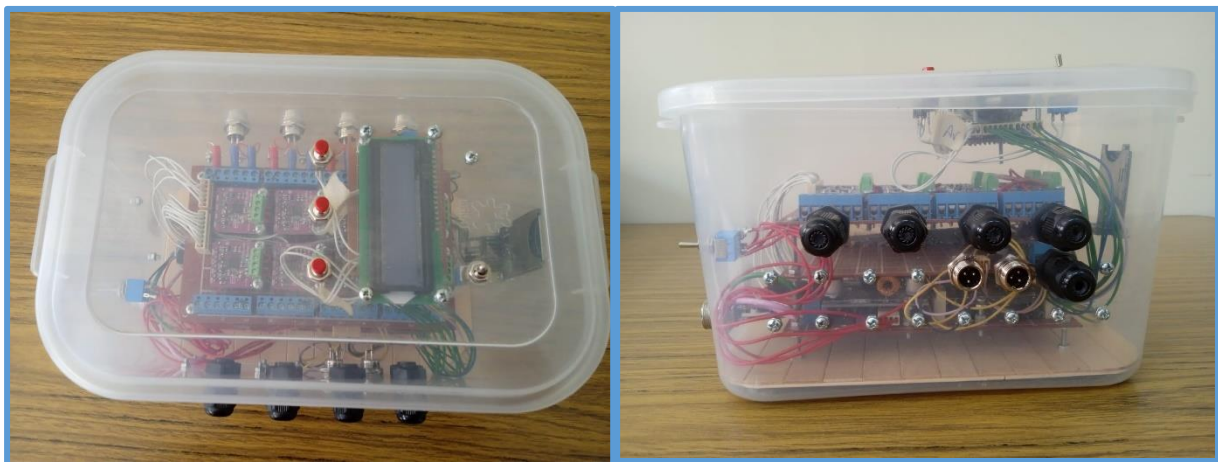
Vista del DGS mostrando el sistema de adquisición automática de datos y sensores instalados.



La energía eléctrica para el funcionamiento de los sistemas de adquisición de datos y la estación meteorológica, la han generado dos paneles solares fotovoltaicos de 180 Wp cada uno, dos baterías de gel ácido de 100 Ah, un inversor de voltaje 24 V DC/220 V AC, 60 Hz de 1000 W (Figura 14).

Figura 17

Vistas del sistema de adquisición y almacenamiento de datos construido usando hardware libre Arduino.



CAPITULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los resultados obtenidos en el trabajo experimental, se analiza para cada objetivo e hipótesis específica establecidos.

4.1 Diseño y construcción del DGS

Objetivo específico 1:

Diseñar y construir un destilador geotérmico solar para que funcione bajo tres formas, reduzca la concentración de arsénico y destile agua de aguas geotermales usando como fuentes energéticas renovables la solar y la geotermia en la zona altoandina de la región Tacna.

Hipótesis específica 1:

El destilador geotérmico-solar diseñado y construido, funciona bajo tres formas diferentes, usando como fuentes energéticas renovables la solar y la geotermia en la zona altoandina de la región Tacna.

El DGS, se ha construido usando materiales adquiridos en el mercado local y el servicio de un taller de ferretería metálica, con cubeta de plancha de acero inoxidable de 1 mm de espesor, volumen de 100cmx80cmx15cm, aislada térmicamente por el fondo y laterales con planchas de tecnopor de 1", carcaza de plancha de fierro galvanizado de 1 mm de espesor, volumen de 106cmx86cmx18,5cm, dos tubos de acero inoxidable de 1" de diámetro y 6 cm de largo para entrada y salida del agua geotermal.

La junta cubeta-cobertor sellada con tiras de cartón prensado de 3 mm de espesor y silicona transparente a efectos de evitar pérdidas de calor y asegurar hermeticidad a pruebas de agua de lluvia, nieve y granizo; volumen total de cubeta de 120 litros y superficie de captación 0,80 m²; volumen de la cámara de evaporación de 0,188 m³; cuatro cobertores de vidrio transparente semi doble de 2 mm de espesor, dos laterales en doble caída con inclinación de 45°, dos frontales verticales; fijos a la base superior de la cámara de evaporación con filos de estructura metálica de fierro galvanizado en ángulo de 90°, pernos, silicona transparente; altura de 47 cm en la parte central (Tabla 6), (Figura 16); cuatro canaletas de plástico de 1" con pequeña pendiente que actúan como receptores-conductores del agua condensada-destilada,

cuyas salidas están conectadas vía manguera a los depósitos exteriores de recolección (Figuras 18, 19).

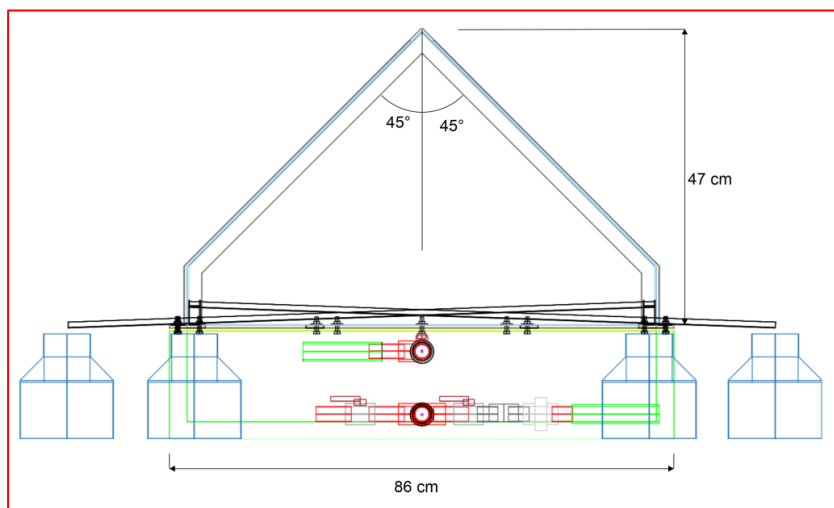
Tabla 6

Materiales y dimensiones principales del destilador geotérmico-solar de doble pendiente.

Descripción	Material	Dimensiones	Unidad
Cubeta interior	Acero inoxidable 1 mm	100x80x15	cm ³
Cubeta exterior	Fierro galvanizado 1 mm	106x86x18,5	cm ³
Inclinación de cobertores	-----	45	grados
Área de cobertores inclinados	Vidrio semi doble 2mm	1,180	m ²
Área de cobertores verticales	Vidrio semi doble 2 mm	0,376	m ²
Volumen cámara evaporación	-----	268	litros
Volumen agua en cubeta	-----	96	litros
Volumen de cubeta	-----	120	litros
Canaletas	Plástico PVC	ancho/altura	1 pulgada
Tuberías entrada y salida	Acero inoxidable	diámetro	Una pulgada
Estructura soporte cobertor	Fierro galvanizado en ángulo 90°	ancho 2 cm	-----
Altura	-----	47	cm
Área fondo cubeta	-----	0,80	m ²

Figura 18

Esquema del destilador geotérmico-solar de doble pendiente en vista frontal.



En las figuras 19 y 20 se muestran los esquemas y dimensiones del DGS en vista superior y lateral.

Figura 19

Esquema y dimensiones del destilador geotérmico-solar en vista superior.

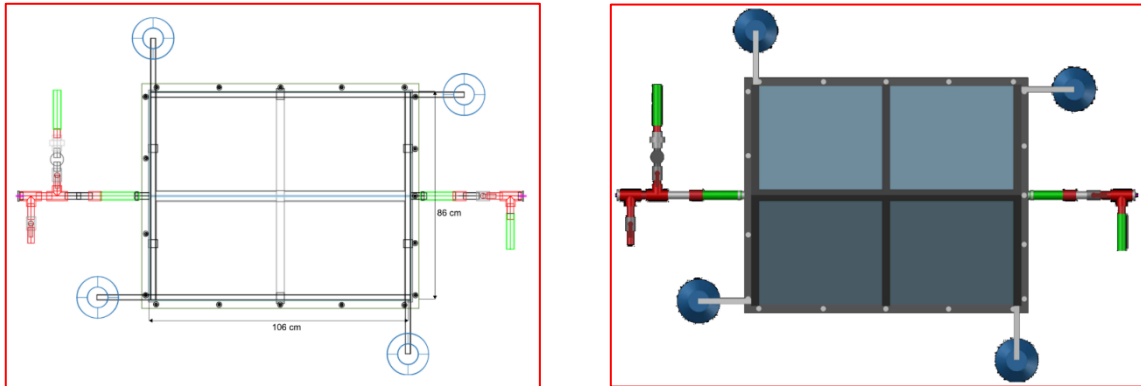
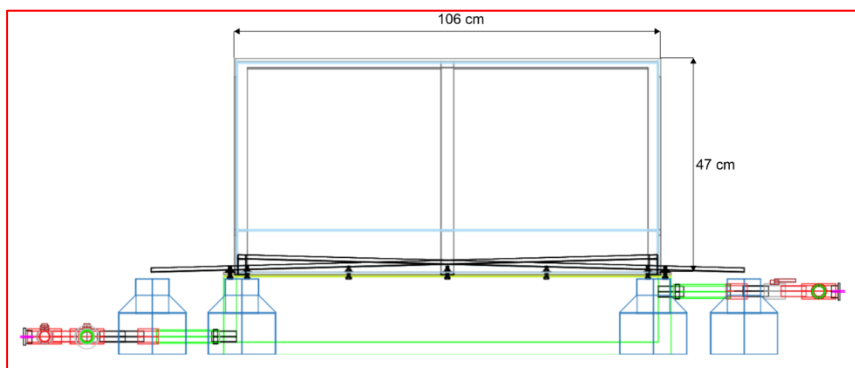


Figura 20

Esquema del destilador geotérmico-solar de doble pendiente en vista lateral.



4.2 Reducción de la concentración de arsénico

Objetivo específico 2:

Determinar la reducción de la concentración de arsénico (mg/l) de aguas geotermales usando un destilador geotérmico-solar bajo tres formas de funcionamiento para consumo humano en la región Tacna.

Hipótesis específica 2:

El destilador geotérmico-solar bajo tres formas de funcionamiento reduce la concentración de arsénico (mg/l) de aguas geotermales para consumo humano en la región Tacna, usando como fuentes energéticas la energía geotérmica y solar.

El destilador geotérmico-solar (DGS) bajo las condiciones meteorológicas de irradiancia solar y características físico-químicas del agua geotermal de Borateras, anexo Chillicollpa, con temperatura de la fuente de agua de 80 °C y concentración inicial de arsénico de 9,58 mg/L, reduce eficientemente la concentración de arsénico bajo las tres formas de funcionamiento: solar+geotermia (SOGE) y solo solar (SS) a un valor medio igual a 0,029 mg/L con una eficiencia de reducción del 99,70 %, seguido de la forma solo geotermia (SG) a 0,039 mg/L, con una eficiencia de reducción del 99,59 % (Tabla 7).

Tabla 7

Valores de la concentración de arsénico inicial y el final y la eficiencia de reducción bajo las tres formas de reducción del DGA.

Formas de funcionamiento	SOGE		SG		SS	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final
Concentración de As (mg/l)	9,580	0,029	9,580	0,039	9,580	0,029
Reducción en (mg/l)	9,551		9,541		9,551	
Eficiencia de reducción (%)	99,70		99,59		99,70	

El arsénico es un elemento químico cuyo símbolo es As, de color blanco-plateado cristalino y semi-metálico, peso atómico 74,922 g/mol, número atómico 33, es inodoro e insípido; en tanto que la del agua es de 44,01 g/mol; esta diferencia en peso atómico es determinante para que, bajo el proceso de la destilación térmica geotérmica-solar, el agua se evapore, permaneciendo por efecto de la gravedad el arsénico en el agua residual geotermal.

4.2.1 Prueba estadística

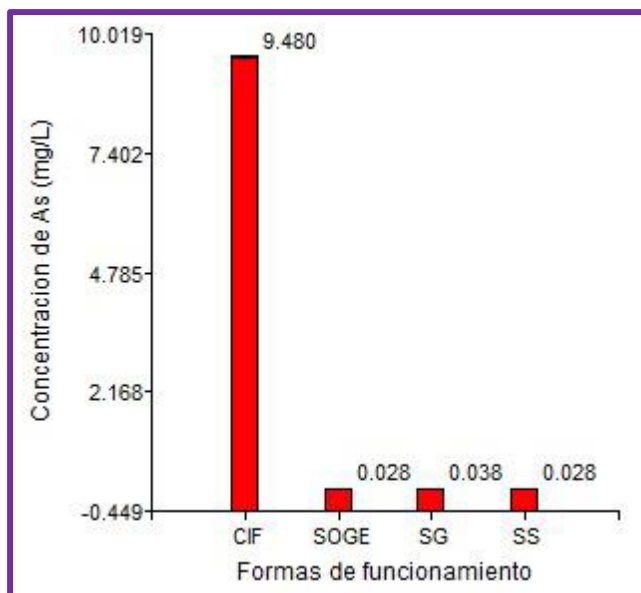
Del análisis correspondiente antes y después del proceso de destilación y la eficiencia de reducción, se determina que no existen diferencias significativas en las concentraciones

finales de arsénico en el agua destilada obtenida bajo las tres formas de funcionamiento; sin embargo, la mejor reducción de arsénico se obtiene bajo las formas de funcionamiento solo solar (SS) y solar-geotermia (SOGE) (Figura 21).

La normalidad para un nivel de significancia $\alpha=0.05$, con la prueba de Ryan - Jainer=0.976, $P=0.100 > \alpha=0.05$, nos indica que los residuos se distribuyen normalmente; todas las varianzas son iguales considerando la prueba de Bartlett=1.39, $P=0.78 > \alpha=0.05$; y bajo la prueba paramétrica de Estadístico de Prueba de Fisher=21717.6, $P=0.000 < \alpha=0.05$. Las concentraciones de arsénico de agua destilada disminuyen con el destilador geotérmico solar, por tanto, se acepta la hipótesis planteada (Figura 22).

Figura 21

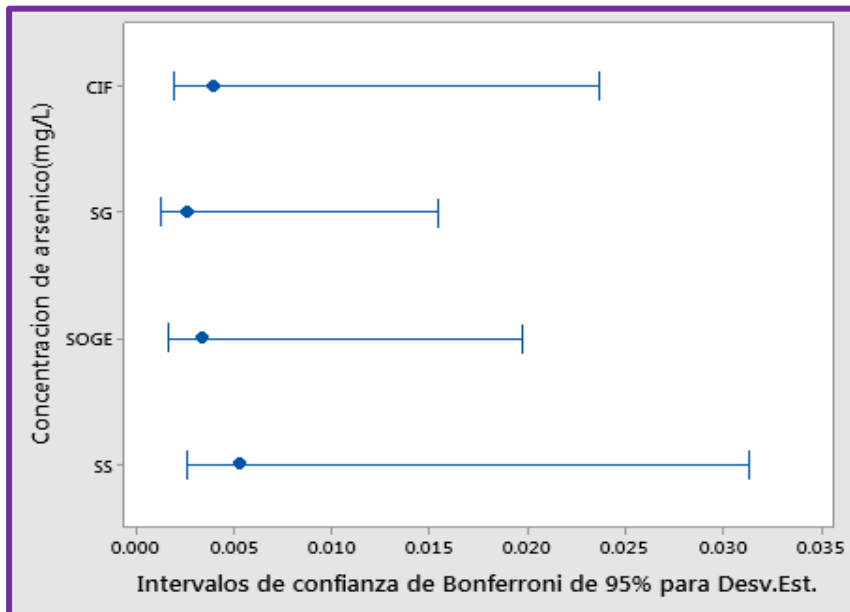
Contraste de la reducción de la concentración de arsénico (mg/L) entre valor inicial y el obtenido para cada forma de funcionamiento del DGS.



Se observa que las concentraciones iniciales de arsénico (mg/L) de la fuente son significativamente diferentes respecto a la concentración final de arsénico (mg/L) para las formas de funcionamiento SOGE, SG, SS, entre ellos son iguales, la de menor promedio es la concentración final de arsénico obtenida bajo la forma de funcionamiento solo SS y SOGE.

Figura 22

Prueba de Bartlett de igualdad de varianzas RESI vs la concentración de arsénico bajo las tres formas de funcionamiento SOGE, SG y SS.



4.3 Volumen de agua destilada

Objetivo específico 3:

Cuantificar el volumen (ml) de agua destilada en la unidad de tiempo con el destilador geotérmico-solar, que usa como fuente energética la energía solar y la geotérmica, bajo tres formas de funcionamiento.

Hipótesis específica 3:

El destilador geotérmico-solar, bajo tres formas de funcionamiento permite incrementar el volumen (ml) de agua destilada para consumo humano usando como fuentes energéticas la energía geotérmica y solar en la región Tacna

El flujo volumétrico de agua geotermal que ingresa al destilador es de 7,03 L/min, por lo tanto, en una hora 420 litros, en 12 horas 5040 litros y en 24 horas 10080 litros.

Los volúmenes de agua destilada horaria obtenidos para cada forma de funcionamiento se muestran en las tablas y figuras siguientes.

4.3.1 Volumen destilado con sólo solar (SS)

El volumen inicial del agua geotermal en la tina o cubeta fue de 96 litros a una temperatura inicial 69 °C, debido a que para esta forma de funcionamiento del destilador inicialmente se carga con agua caliente de la fuente geotermal. Para esta forma de funcionamiento, el flujo volumétrico del agua geotermal es nulo, considerando que se corta la entrada de agua al DGS (Tabla 8).

Tabla 8

Volúmenes de agua destilada (ml) horaria para forma de funcionamiento solo solar (SS)

Tiempo (h)	Volumen destilado (ml)					Flujo agua (l/min)	
	V1	V2	V3	V4	V _{TOTAL}	Vacum	Vf
06:00	0	0	0	0	0	0	0,00
07:00	308	154	302	174	938	938	0,00
08:00	280	128	276	142	826	1764	0,00
09:00	156	66	152	37	411	2175	0,00
10:00	148	56	144	66	414	2589	0,00
11:00	152	56	124	56	388	2977	0,00
12:00	98	44	94	54	290	3267	0,00
13:00	116	50	144	50	360	3627	0,00
14:00	100	42	96	38	276	3903	0,00
15:00	90	38	96	36	260	4163	0,00
16:00	82	34	78	28	222	4385	0,00
17:00	68	29	60	23	180	4565	0,00
18:00	30	12	32	10	84	4649	0,00

En la figura 23, se observa la variación horaria del volumen de agua destilada para la forma solo solar (SS), es decir funciona solo bajo irradiancia solar global incidente durante el día, sin aporte energético geotermal, bajo condiciones de un día nublado. V1, V2 V3 y V4 representan los volúmenes de agua destilada por cada una de las partes del cobertor de vidrio, definidos en los párrafos anteriores.

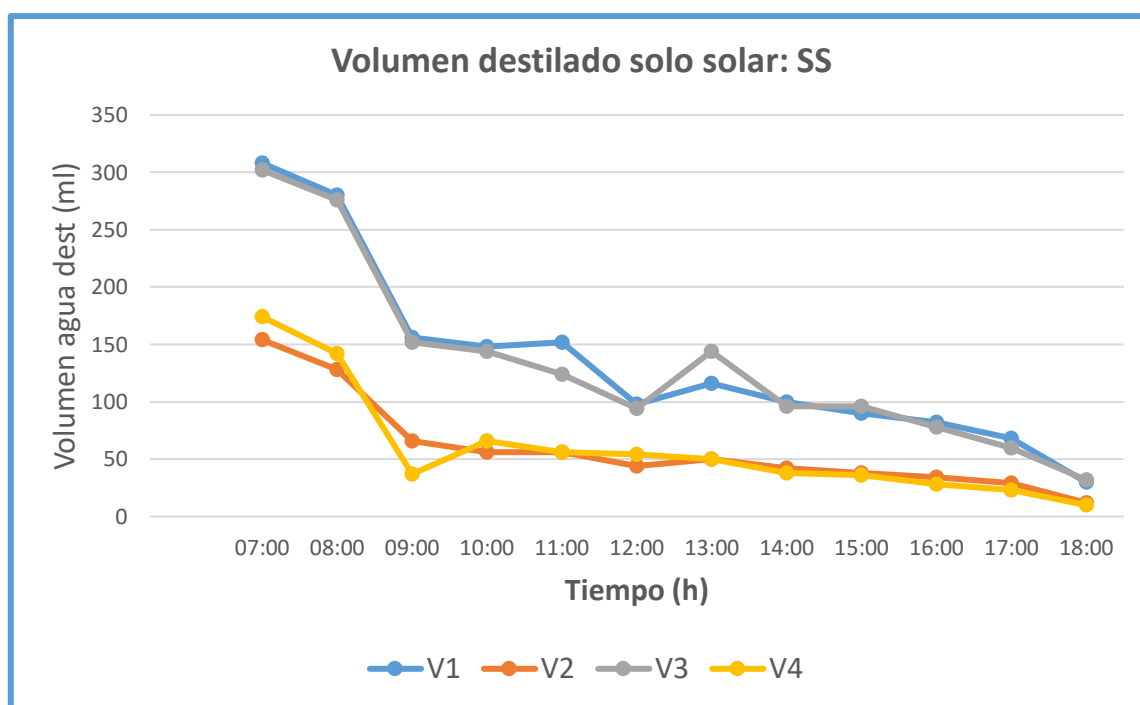
Para esta forma de funcionamiento, se repite que los cobertores inclinados destilan mayor volumen que los verticales debido a que tiene mayor superficie de condensación del

vapor en el interior del destilador, en los inclinados la variación horaria del volumen de agua destilada es entre (300–30) ml, debido a que el proceso se inicia con agua geotermal a temperatura de 67 °C, la cual disminuye durante el día, lo que determina que la tasa de evaporación del agua desde la cubeta se reduzca con la consiguiente disminución del agua destilada. La variación horaria del volumen destilado es muy pequeña en cada una de las partes de las superficies cobertoras.

El volumen de agua destilada horaria en cada una de las partes, bajo esta forma también es influenciado por la variación de la irradiancia solar global, por la variación de la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento, y la precipitación fluvial propias de la zona geotermal.

Figura 23

Variación horaria del volumen de agua destilada bajo la forma solo solar (SS), para un día nublado.



4.3.2 Volumen destilado con sólo geotermia (SG)

Para esta forma de funcionamiento, el volumen inicial de agua geotermal en la cubeta es de 96 litros, que permanece constante durante las 24 horas de funcionamiento (Tabla 9).

Tabla 9

Volúmenes de agua destilada (ml) y flujo volumétrico de agua geotermal (l/min) para la forma de funcionamiento solo geotermia (SG).

Tiempo (h)	Volumen destilado (ml)						Flujo agua (l/min)
	V1	V2	V3	V4	V _{TOTAL}	Vacumu	Vf
06:00	0	0	0	0	0	0	6,87
07:00	441	160	400	138	1139	1139	6,95
08:00	471	176	402	136	1185	2324	6,94
09:00	444	176	414	140	1174	3498	6,96
10:00	448	168	420	152	1188	4686	7,03
11:00	410	154	420	152	1136	5822	6,95
12:00	490	175	413	161	1239	7061	7,12
13:00	459	180	430	160	1229	8290	7,05
14:00	485	150	470	142	1247	9537	7,04
15:00	470	172	471	140	1253	10790	7,05
16:00	465	158	460	150	1233	12023	7,10
17:00	466	150	462	130	1208	13231	6,87
18:00	420	162	444	134	1160	14391	7,89
19:00	450	208	550	155	1363	15754	7,12
20:00	448	210	546	149	1353	17107	6,88
21:00	445	180	532	185	1342	18449	6,98
22:00	435	184	517	177	1313	19762	7,21
23:00	481	190	528	148	1347	21109	6,87
24:00	476	189	526	140	1331	22440	7,01
01:00	473	190	515	122	1300	23740	7,16
02:00	432	180	489	168	1269	25009	7,08
03:00	440	176	485	165	1266	26275	7,10
04:00	420	164	475	165	1224	27499	7,06
05:00	425	171	480	162	1238	28737	7,15
06:00	428	176	481	164	1249	29986	6,95

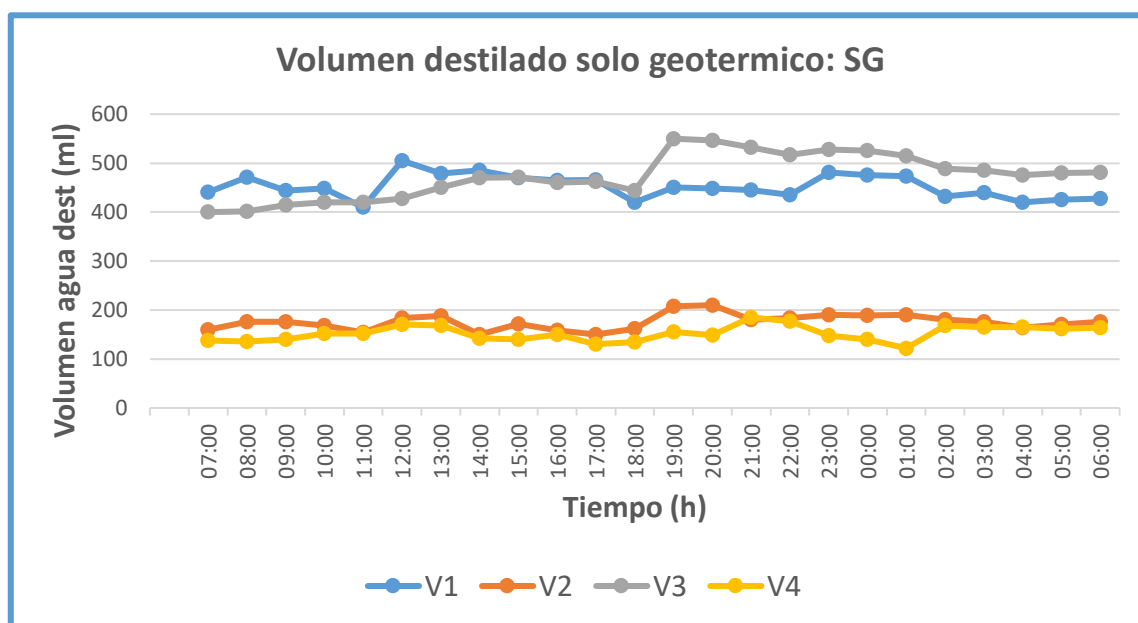
En la figura 24, se visualiza la variación horaria del volumen de agua destilada para la forma sólo geotérmico (SG), es decir que durante las 24 horas ingresa continuamente agua geotermal al destilador, a efectos que no incida irradiancia solar directa y difusa sobre la

superficie cobertora, el DGS se cubre completamente con material opaco de plancha de tripley y plástico negro, y durante la noche se retira tal cubierta. V1 corresponde al volumen de agua destilada por la superficie cobertora inclinada 45° orientada al este con una superficie de $0,59 \text{ m}^2$, V2 el volumen destilado por el cobertor vertical orientado al norte (salida del agua geotermal del DGS) de $0,19 \text{ m}^2$, V3 el volumen destilado por el cobertor inclinado 45° orientado al oeste de $0,59 \text{ m}^2$, y V4 el volumen destilado por el cobertor vertical orientado al sur de $0,18 \text{ m}^2$ (entrada de agua geotermal al DGS).

Los cobertores inclinados con superficie total de $1,18 \text{ m}^2$ destilan mayor volumen que los verticales con $0,376 \text{ m}^2$, debido a que tiene mayor superficie de condensación del vapor en el interior del destilador, durante las 24 horas la variación horaria del volumen de agua destilada en los cobertores indicados es entre (400-550) ml y entre (100-220) ml, respectivamente. Existen cambios de las variaciones de los volúmenes destilados durante el día y la noche, el cual se deben a la fuerte variación de la velocidad del viento (0-16) m/s y dirección entre (0-180) $^\circ\text{C}$, con fuertes ráfagas, que influyen en el cambio de temperatura de los cobertores y por consiguiente en la velocidad de condensación del vapor en las superficies interiores, otro factor que influye es el cambio de la temperatura ambiental en la zona en un rango entre (2 – 16) $^\circ\text{C}$.

Figura 24

Variación horaria del volumen de agua destilada por el DGS bajo la forma SG.



4.3.3 Volumen destilado con geotermia+solar (SOGE)

En la Tabla 10, se visualizan los volúmenes de agua destilada para la forma de funcionamiento solar-geotermia (SOGE).

Tabla 10

Volúmenes de agua destilada (ml) y flujo volumétrico de agua geotermal (l/min) para la forma de funcionamiento solar-geotermia (SOGE)

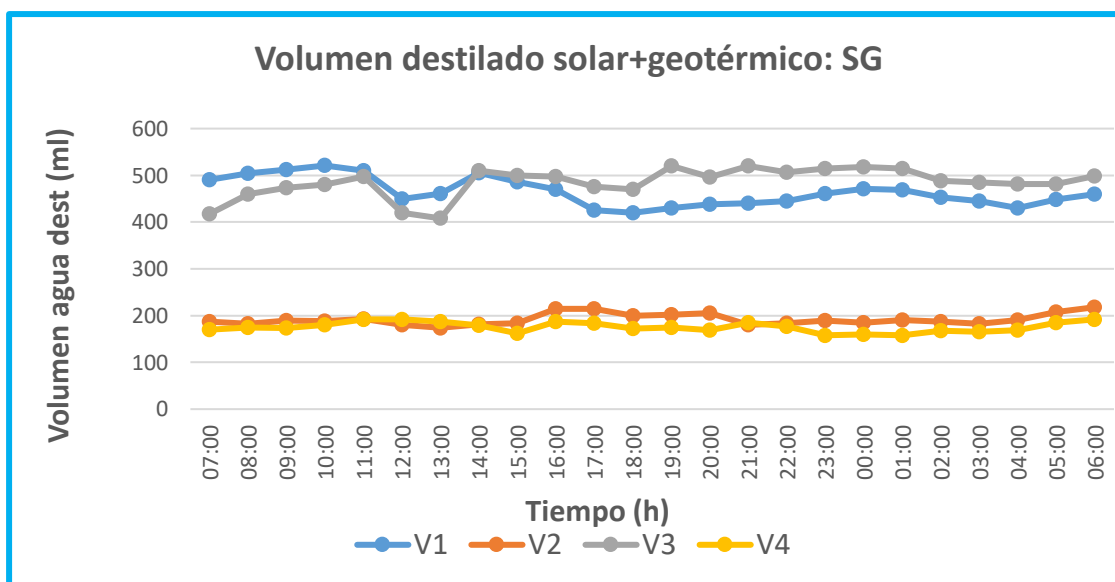
Tiempo (h)	Volumen destilado (ml)						Flujo agua (l/min)
	V1	V2	V3	V4	V _{TOTAL}	Vacum	Vf
06:00	0	0	0	0	0	0	7,01
07:00	490	187	418	170	1265	1265	7,04
08:00	504	182	460	175	1321	2586	7,19
09:00	512	189	474	173	1348	3934	7,22
10:00	521	188	480	180	1369	5303	7,32
11:00	510	193	497	192	1392	6695	7,28
12:00	450	180	420	192	1242	7937	7,10
13:00	461	174	408	187	1230	9167	7,36
14:00	505	181	510	179	1375	10542	6,97
15:00	486	184	500	162	1332	11874	6,98
16:00	470	214	497	187	1368	13242	7,09
17:00	426	214	476	184	1300	14542	7,11
18:00	420	200	470	172	1262	15804	6,99
19:00	430	202	520	175	1337	17141	7,02
20:00	438	205	496	169	1308	18449	6,98
21:00	440	180	520	185	1325	19774	6,99
22:00	445	184	507	177	1313	21087	7,11
23:00	461	189	515	158	1323	22410	6,99
24:00	471	185	518	160	1334	23744	7,11
01:00	469	190	515	158	1332	25076	7,06
02:00	453	187	488	168	1296	26354	7,02
03:00	445	183	485	165	1278	27632	7,07
04:00	430	190	481	169	1270	28902	7,02
05:00	448	208	482	185	1323	30225	7,05
06:00	460	218	498	192	1368	31601	6,98

En la figura 25, se observa la variación horaria del volumen de agua destilada para la forma de funcionamiento geotermia-solar (SOGE), en forma continua durante las 24 horas, en el día con aporte solar-geotermia y en la noche con solo aporte geotermal, el agua geotermal ingresa en forma continua durante las 24 horas; V1, V2 V3 y V4 representan los volúmenes de agua destilada por cada una de las partes del cobertor de vidrio, definidos en párrafos anteriores.

Se repite que, los cobertores inclinados destilan mayor volumen que los verticales debido a que tiene mayor superficie de condensación del vapor en el interior del destilador, en los inclinados durante las 24 horas el volumen horario de agua destilada varía ligeramente entre (400-520) ml, la mayor variación acontece durante el día en función a la variación horaria de la irradiancia solar global incidente sobre el destilador entre las 11:00 y 14:00 horas; y en los verticales la variación es entre (160-220) ml.

Figura 25

Variación horaria del volumen de agua destilada por el DGS bajo la forma geotermia-solar (SOGE).



El volumen de agua condensada-destilada en cada una de las partes, como en las dos formas anteriores de funcionamiento, es influenciado durante el día por la variación de la irradiancia solar global y durante las 24 horas por la variación de la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento, y la precipitación fluvial propias de la zona altoandina.

En la figura 26, se muestra la producción de agua destilada horaria total para cada una de las tres formas de funcionamiento del DGS, bajo la forma solo geotermia (SG) y solar-

geotermia (SOGE) el volumen horario varía en el rango de (1180-1400) ml, con mayor variación durante el día, en tanto que durante la noche se mantiene más uniforme.

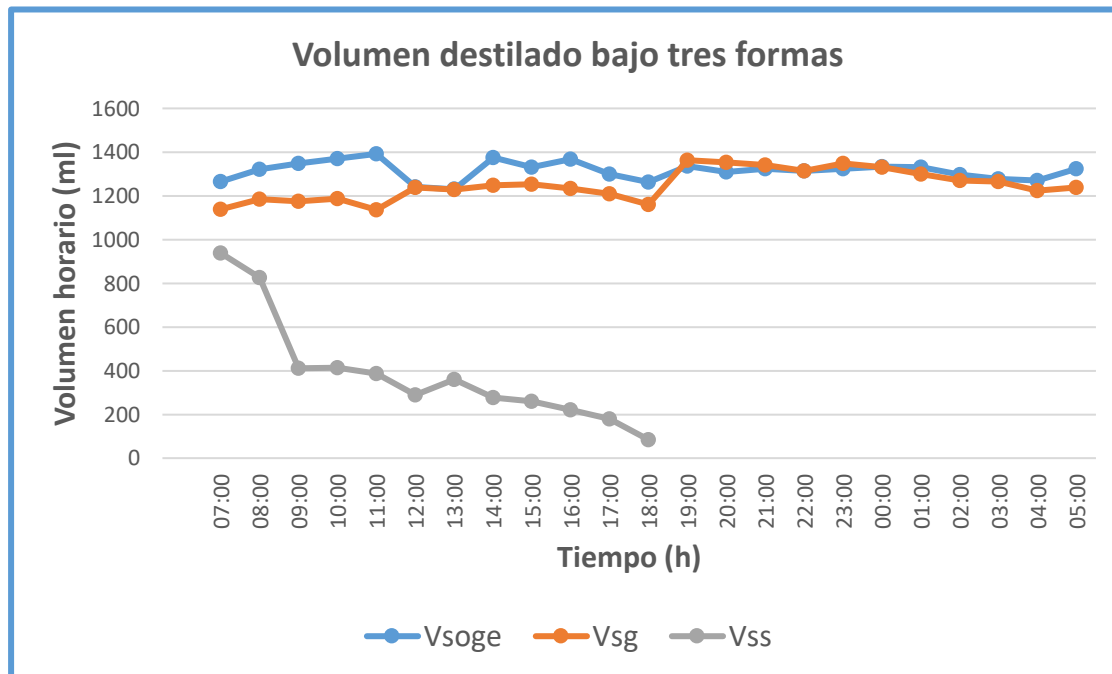
Para la forma SOGE, el volumen total destilado diario es de 29968 ml, con producción promedio de 1249 L/h, en tanto que para la forma SG es de 31601 ml con producción promedio de 1317 ml/h, y bajo la forma SS de 4649 ml, con producción promedio de 387 ml/h.

La producción de agua destilada para las formas SOGE y SG están en el rango de (1180-1400) ml durante las 24 horas, mucho mayor respecto a la forma SS durante solo el día.

En la figura 27, se presenta la variación de la producción del volumen de agua destilada acumulada para cada una de las tres formas de funcionamiento del DGS, durante las 24 horas, bajo las formas de funcionamiento SOGE produce 31601 ml (V_{soge}) y SG 29986 ml (V_{sg}) con una diferencia de 1615 ml a favor del SOGE, debido a la contribución solar durante el día entre las 06:00 h y 18:00 h.

Figura 26

Variación horaria del volumen diario total de agua destilada por el DGS para las tres formas V_{soge} (SOGE), V_{sg} (SG) y V_{ss} (SS).



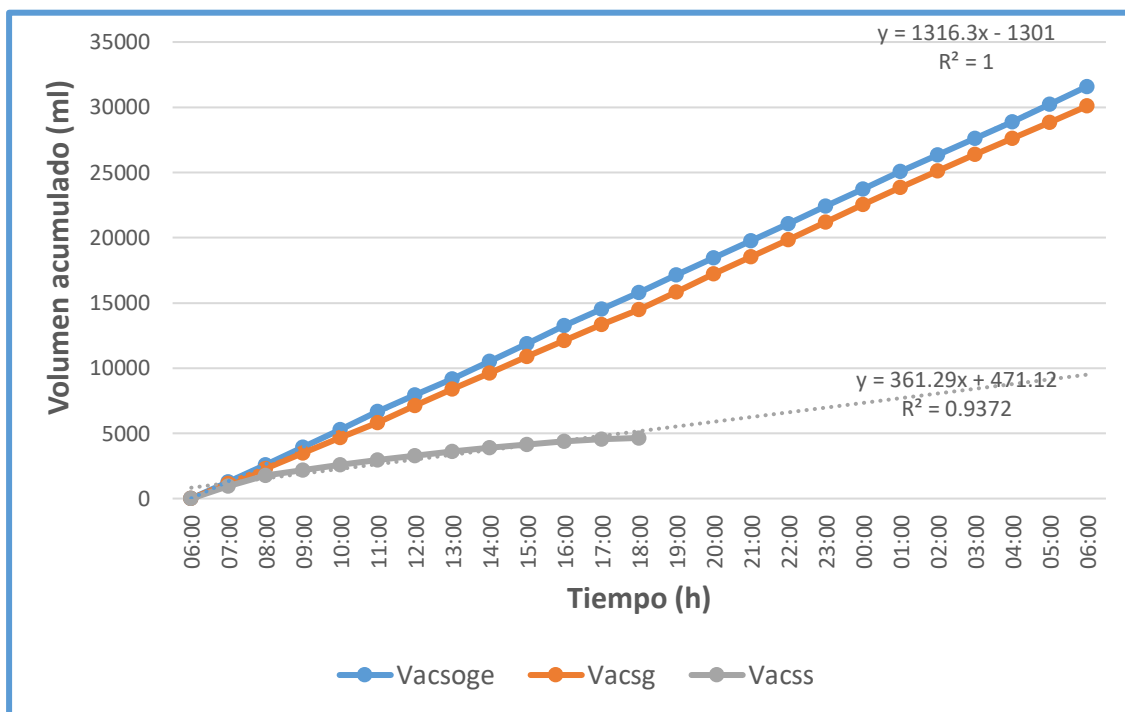
El destilador produce agua destilada durante las 24 horas del día en forma ininterrumpida, independientemente de las variaciones de las condiciones meteorológicas de la zona, en días despejados, seminublados y nublados, temperatura ambiente, lluvias

intermitentes, caída de granizo, variación de la velocidad del viento con ráfagas de 16 m/s y del cambio intempestivo de la dirección y quietud del mismo.

En tanto que para el funcionamiento SS produce solamente en el día, cuyo volumen horario y diario dependerá si el día se presente despejado, seminublado y nublado, la figura corresponde a un día nublado en razón a que el día de la evaluación se presentó con nubes permanentes y precipitación, propios de la zona en esta temporada, bajo estas condiciones produjo 4619 ml (Vss) de agua destilada, mucho menos que los producidos bajo las formas SOGE y SG.

Figura 27

Variación horaria del volumen total acumulado de agua destilada por el DGS para las tres formas de funcionamiento: Vsoge (SOGE), Vsg (SG) y Vss (SS).



Bajo el uso de la energía geotérmica la producción es casi constante durante la noche, en tanto con solar-geotermia durante el día entre las 08:00 a 17:00 la producción crece levemente, bajo fuente energética solo solar (SS) se produce agua destilada bajo condiciones de días con brillo solar, seminublados y nublados, en tanto que en la noche la producción es casi nula, el promedio horario de flujo volumétrico de agua destilada bajo la forma SOGE es de 1,316 L/h, SG de 1,249 L/h y de SS de 0,139 L/h (Tabla 11).

Tabla 11

Volumen diario (Vd), flujo de agua destilada horaria (Vh) y productividad (P) del DGS para las tres formas de funcionamiento.

SOLAR+GEOTERMIA (SOG)			SOLO GEOTERMIA (SG)			SOLO SOLAR (SS)		
Vd (L)	Vh (L/h)	P (L/m ² dia)	Vd (L)	Vh (L/h)	P (L/m ² dia)	Vd (L)	Vh (L/h)	P (L/m ² dia)
31,601	1,316	39,501	29,986	1,249	37,482	4,619	0,139	5,774

4.3.4 Prueba estadística

Según el estadístico de prueba Ryan-Jainer=0.976, $P=0.100 > \alpha=0.05$ los residuos se distribuyen normalmente; con la prueba de Bartlett=3.15, $P=0.207 > \alpha=0.05$ se concluye que todas las varianzas son iguales; bajo la prueba de rachas $P=0.762 > \alpha=0.05$ los residuos de los datos son aleatorios; según la prueba de Fisher=2875.44, $P=0.000 < \alpha=0.05$ se concluye que el volumen de agua destilada en la unidad de tiempo no disminuye con el destilador geotérmico solar.

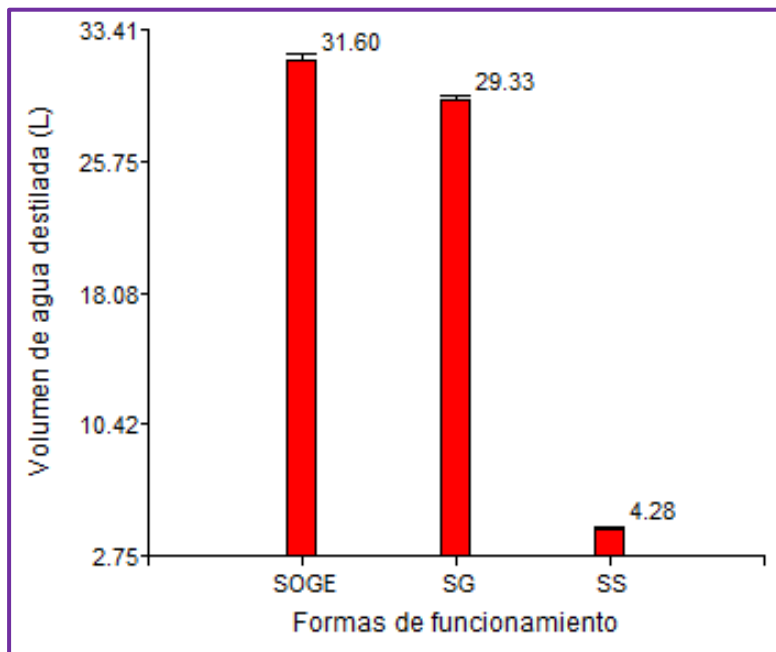
Según la prueba de contraste Tukey, se observa que el volumen de agua destilada en la unidad de tiempo bajo las tres las formas de funcionamiento: SOGE, SG, y SS son significativos, el mayor volumen de agua destilada es bajo la forma SOGE (Figura 28), por tanto se acepta la hipótesis planteada.

4.4 Caracterización térmica

Paralelamente a la medición de la reducción de arsénico y del volumen de agua destilada, se ha monitoreado en forma automática temperaturas del DGS en diferentes puntos del sistema a efectos de su caracterización térmica-energética: Tagua es la temperatura del agua geotermal en la tina del DGS, T_{vap} temperatura del vapor de agua en la cámara de vaporización, T_{iv} temperatura de la superficie interior y T_{ev} temperatura de la superficie exterior del vidrio cobertor, T_{amb} temperatura ambiente, T_{ea} y T_{sa} temperatura entrada y salida del agua geotermal al DGS, T_f temperatura del agua de la fuente geotermal y flujo volumétrico del agua geotermal (V_f) a través del DGS.

Figura 28

Contraste del volumen de agua destilada (ml) por cada una de las tres formas de funcionamiento del destilador geotérmico-solar (SOGE), (SS) y (SG).

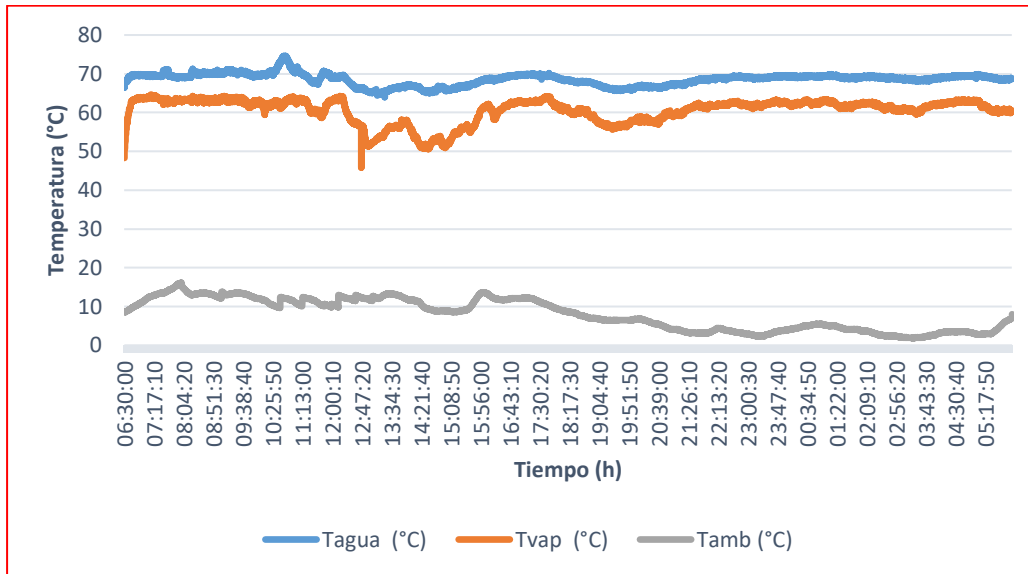


El coeficiente de regresión lineal $R^2 = 1$ entre la variable dependiente volumen (ml) de agua destilada acumulada diaria y la independiente el tiempo (h) están relacionadas en un 100 % para la forma de funcionamiento SOGE, en un 93,72 % para la forma de funcionamiento SS (Figura 28).

Para la forma de funcionamiento solar-geotermia (SOGE), observamos que la variación de la temperatura del vapor en la cámara de vaporización (T_{vap}) es entre $(52 - 65)^\circ\text{C}$, menor que la del agua geotermal (T_{agua}) en la cubeta del DGS en el rango de $(66 - 70)^\circ\text{C}$, la temperatura promedio de la primera es de $60,52^\circ\text{C}$, en tanto que de la segunda de $68,56^\circ\text{C}$, el salto de la diferencia de temperaturas promedio entre estos parámetros es de $8,04^\circ\text{C}$, lo que nos indica que desde el agua en la cubeta existen pérdidas térmicas por conducción a través de las paredes laterales y el fondo, como también por convección y radiación desde la superficie al medio ambiente, la cual se incrementa cuando la temperatura ambiente disminuye abruptamente, y cuando suceden ráfagas del viento propias de la zona. La temperatura ambiente durante las 24 horas de la evaluación varía en el rango de $(2-16)^\circ\text{C}$, con un valor promedio diario de $7,96^\circ\text{C}$ (Figura 29).

Figura 29

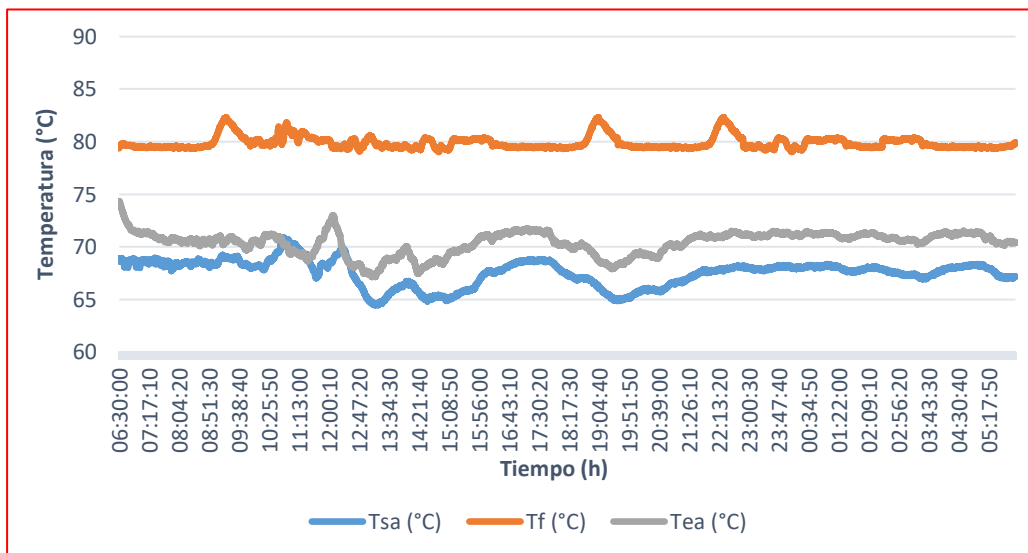
Variación de la temperatura; *Tagua*: del agua en la cubeta; *Tvap*: del vapor de agua en la cámara de vaporización; *Tamb*: temperatura ambiente en función al tiempo.



Los perfiles térmicos muestran una mayor variación durante el día bajo irradiación solar, mientras que durante la noche son más estables. En la Figura 30, se muestra la variación térmica del agua geotermal en la entrada (Tea), salida (Tsa) del DGS y de la fuente (Tf), las cuales casi se mantienen constantes en promedio 70, 38 °C, 67,53 °C y 79,88 °C, respectivamente.

Figura 30

Variación de la temperatura en la salida (Tsa) y la entrada (Tea) del agua geotermal del DGS en función del tiempo.

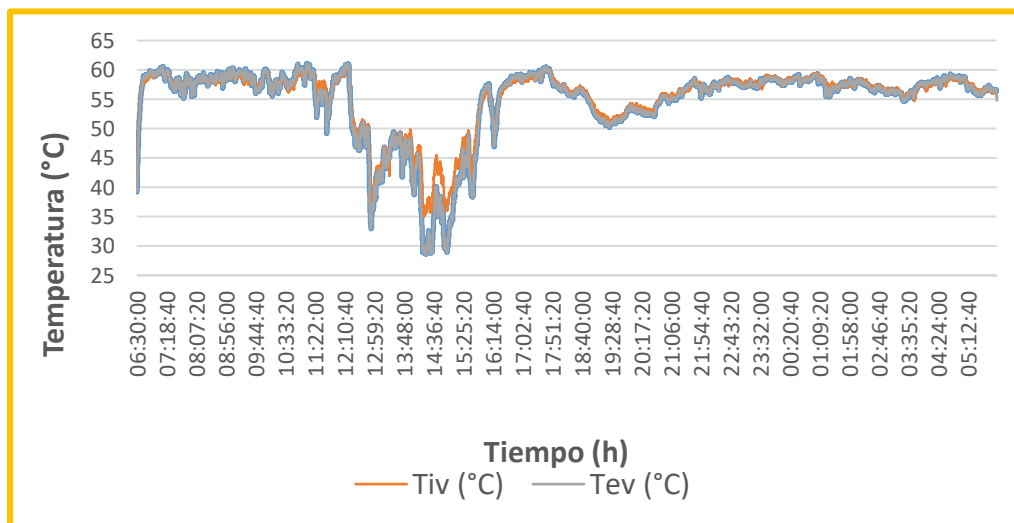


La diferencia de temperatura promedio entre la entrada y la salida es de $2,85\text{ }^{\circ}\text{C}$, muy importante para determinar la eficiencia energética del DGS, la variación durante el día bajo irradiación solar es mayor que durante la noche, debido a la variación de la irradiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente.

En la Figura 31, se muestra la variación y diferencia entre las temperaturas de la superficie interior del vidrio cobertor (T_{iv}) en contacto con el vapor interno de la cámara de vaporización y de la superficie exterior (T_{ev}) expuesta al medio ambiente exterior, para la forma de funcionamiento solar-geotermia (SOGE).

Figura 31

Variación de la temperatura en la superficie interior (T_{iv}) y exterior (T_{ev}) del vidrio cobertor del DGS en función del tiempo, para forma de funcionamiento SOGE.



La temperatura promedio durante el funcionamiento continuo solar-geotermia durante el día y noche de la superficie interior es de $55,28\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la exterior de $54,77\text{ }^{\circ}\text{C}$, resultando una diferencia de $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}$, este gradiente térmico es lo que permite la condensación del vapor del agua evaporada sobre la superficie interna del vidrio cobertor, bajo irradiación solar es ligeramente mayor que durante la noche, pero en ambos periodos de tiempo son ligeramente variables entre $(55 - 60)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por otro lado, se puede observar que durante las 11:30 a 16:30 horas acontece una fuerte disminución de ambas temperaturas hasta $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una diferencia de hasta $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido a la precipitación pluvial y granizo sobre la superficie exterior del DGS, algo característico de la

zona altoandina, enfriando fuertemente el vidrio cobertor, con el consiguiente aumento del volumen de agua destilada.

4.5 *Influencia de la lluvia y granizo en el volumen de agua destilada*

En la Tabla 12, se muestra el incremento del volumen horaria de agua destilada por el DGS bajo la forma SOGE para un día de irradiancia solar seminublado, con temperatura de ingreso de agua geotermal de 69 °C, flujo volumétrico de agua geotermal a través del DGS de 7,06 L/min, entre las 13:00 y 16:00 horas en la que precipitó lluvia y granizo sobre la superficie exterior del vidrio cobertor instalado en el anexo de Chillicollpa del campo geotermal de Borateras, Tarata, Tacna, el volumen destilado en condiciones normales es de 5161 ml y con lluvia y granizo de 6138 ml, obteniendo un incremento de 931 ml de agua destilada, que representa un 18,04%, lo cual constituye un plus muy importante considerando que el DGS diseñado y construido es para que funcione constantemente bajo la forma SOGE bajo las condiciones climáticas de la zona altoandina, caracterizada porque durante casi todo el año llueve y graniza en promedio 250 mm, llegando a temperaturas ambientales extremas de hasta -25 °C durante las temporadas de frecuentes heladas entre los meses de mayo a setiembre. V1, V2, V3 y V4 representan los volúmenes en cada una de las partes del cobertor del DGS.

Tabla 12

Incremento del volumen de agua destilada con el DGS bajo condiciones de lluvia y granizo, bajo funcionamiento SOGE.

Tiempo (h)	13:00	13:00	14:00	14:00	15:00	15:00	16:00	16:00
V1 (ml)	600	480	510	501	750	498	714	485
V2 (ml)	188	188	150	150	250	190	158	158
V3 (ml)	612	450	500	492	622	505	464	464
V4 (ml)	168	168	142	142	140	140	170	150
Vtotal (ml)	1568	1286	1302	1285	1762	1333	1506	1257
Incremento (ml)	282		17		383		249	

4.6 **Eficiencia del destilador**

Según las ecuaciones de eficiencia energética establecidas para cada forma de funcionamiento, se ha cuantificado tales parámetros considerando el aporte solar y el geotérmico, el calor latente de vaporización y el calor específico del agua geotermal se han considerado teniendo en cuenta la temperatura promedio del agua geotermal en la tina o cubeta del DGS, los resultados se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13

Eficiencias y aportes energéticos para cada forma de funcionamiento del DGS

FORMA DE FUNCIONAMIENTO	EFICIENCIA ENERGÉTICA (%)	APORTE ENERGÉTICO	PRODUCTIVIDAD (L/m²día)
SOLO SOLAR (SS)	12,27	100 % solar	5,774
SOLO GEOTÉRMICO (SG)	36,76	100 % geotérmico	37,482
GEOTÉRMICO+SOLAR (SOGE)	29,68	25,29 % solar 74,71 % geotermia	39,501

Para la forma de funcionamiento solo solar (SS), se ha considerado la temperatura promedio del agua en la cubeta de 41,31 °C, teniendo en cuenta que el proceso de destilación se inicia a temperatura de 69 °C; por otro lado el que presenta mayor eficiencia energética es bajo la forma de funcionamiento solo geotérmico (SG) a pesar que recibe menos energía que el caso SOGE, debido a que el incremento del volumen de agua destilada diario entre una forma y la otra es de tan solo 2,270 litros, posiblemente a un incremento de pérdidas térmicas en las diferentes partes del DGS; en tanto que a través de la forma de funcionamiento solo solar (SS) presenta la eficiencia más baja debido a la baja productividad diaria de agua destilada.

CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Diseño y construcción del destilador geotérmico-solar

El destilador geotérmico-solar diseñado y construido es de bajo costo, equivalente a mil soles (S/ 1000,00 o \$ 270,00 USA, 338 \$ USA/m²), construido con materiales que se adquieren en el mercado local, con el apoyo de talleres simples de ferretería metálica local, fácil de construir e instalar, que funciona en forma híbrida con energía geotermia de baja entalpía a diferentes flujos volumétricos y temperatura de entrada del agua geotermal y la solar global en días nublados, semi nublados y despejados, de altos potenciales energéticos regionales; en tanto que (Litter et al., 2012) indica que en América Latina, los problemas de la gestión del agua son muy complejos debido a la falta de tecnologías maduras para la desinfección, tratamiento, descontaminación pero extremadamente caras, por consiguiente en la zona altoandina de Tacna podemos usar dos energías renovables disponibles la solar y la geotermia en forma híbrida para reducir la concentración de arsénico, otros metales y metaloides, y contribuir a mejorar la calidad de aguas geotermiales, calidad de vida y salud de la población involucrada, en concordancia con lo que indican (Karydakís et al., 2005),(Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003), (Bayer et al., 2013).

El destilador se ha construido con materiales que se adquieren en el mercado local y es un equipo de tecnología y funcionamiento muy simple, corroborado (Panchal et al., 2011), en concordancia con lo recomendado por (Ullah & Rasul, 2019) quienes indican que para mejorar la disponibilidad de agua en el mundo para consumo humano debemos utilizar energías renovables para procesos de desalinización y descontaminación; en tanto que (Wendt et al., 2015) indican que los puntos en común entre la geotermia y solar térmica es que pueden combinarse en sistemas híbridos, considerando que ambas tecnologías utilizan fluidos caloportadores para generar y almacenar energía térmica.

5.2 Reducción de la concentración de arsénico

Objetivo específico 2:

Determinar la reducción de la concentración de arsénico (mg/L) de aguas geotermiales usando un destilador geotérmico-solar bajo tres formas de funcionamiento para consumo humano en la región Tacna.

El agua para el consumo humano cada vez es más escasa y de capital importancia para la vida (Carbajal & Gonzales, 2012), debido a la diversa contaminación que afecta a la salud humana (Londoño et al., 2016), (Chávez & Toledo, 2011),(Reyes et al., 2016), en la investigación se ha desarrollado un tipo de destilador geotérmico-solar que funciona con energía solar y geotérmica de baja entalpía, habiéndose reducido por destilación térmica la concentración de arsénico de aguas geotermales de 9,56 mg/L a 0,029 mg/L. Así, (Alarcón & Gutiérrez, 2022) ante la problemática de la toxicidad del de arsénico presente en cuerpos de agua y alimentos, recomiendan que se debe continuar con la investigación para encontrar las mejores procesos para el tratamiento rentable de remoción del arsénico y sus derivados, a efectos de contar con agua potable segura y saludable con concentraciones mínimas o nulas con planes de mitigación para reducir los riesgos en la salud humana, coincidente con los objetivos y resultados de la presente investigación; en tanto que (Francisca et al., 2014) reportan que con el proceso de coagulación-floculación han removido arsénico con eficiencias entre (0-95)%, mientras que el obtenido con el DGS es con el 99,71%.

Diferentes centros de investigación a nivel mundial han desarrollado y validado tres tecnologías de bajo costo y con diferentes eficiencias para el tratamiento de aguas, la desinfección solar, remoción de arsénico por oxidación solar y la fotocátalisis heterogénea solar con Dióxido de Titanio, pero con procesos dependientes de la energía solar (Litter et al., 2012).

Por otro lado, (Quispe & Malpartida, 2017), (Avenidaño et al., 2012), reportan que químicamente han removido arsénico del agua del río Sama de una concentración de 0,37 mg/L a 0,01 mg/L en un tiempo de 170 minutos, usando energía solar, en tanto que con nuestro sistema se logrado reducir el arsénico con alta concentración inicial, de 9,56 mg/L a 0,029 mg/L bajo el principio físico de la evaporación-condensación, por consiguiente con el destilador geotérmico-solar se puede mejorar el abastecimiento de agua para consumo humano del 65 % de las 52 comunidades de la región cuyas aguas registran niveles de arsénico por encima del LMP de 0,01 mg/L (MCLCP, 2017), similarmente lo confirman (López et al., 2012), (Yanez et al., 2005).

Gamarra et al., (2022) reportan que usando nanomateriales de TiO_2 dopado con Fe y sintetizado por el método sol gel, la eficiencia de remoción de arsénico del agua con concentraciones iniciales entre 5 mg/L y 0,5 g/L es del 88 % con un pH 7 y del 94 % para un pH5, eficiencias de remoción por debajo obtenidas con el DGS; por consiguiente con el destilador geotérmico-solar se puede mejorar el abastecimiento de agua para consumo humano de las comunidades altoandinas de la región cuyas aguas registran niveles de arsénico por

encima del LMP de 0,01 mg/L MCLCP, 2017), en tanto que (Ghosal et al., 2018) reportan que usando olivina impregnado con hierro se elimina eficazmente por adsorción el arsénico (III) del agua bajo el método de impregnación-calcinación.

La concentración de arsénico final reducida a 0,029 y 0,039 mg/L, aun es ligeramente mayor de lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua potable que no debe exceder a 0,01 mg/L para no afectar la salud humana (OMS, 2006), igualmente establecida por el Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano en el Perú (Diresa, 2011).

5.3 Volumen de agua destilada

Objetivo específico 2:

Cuantificar el volumen (ml) de agua destilada en la unidad de tiempo con el destilador geotérmico-solar bajo tres formas de funcionamiento, que utilice como fuente energética la energía solar y la geotérmica.

El proceso físico de la evaporación del agua producida por la energía solar y el calor sensible geotermal de baja entalpia y la condensación del vapor en la superficie interna del cobertor de vidrio y el contacto de la superficie exterior con la atmósfera, hacen posible la destilación de aguas geotermales de alto contenido inicial de arsénico, bajo la forma de funcionamiento solar+ geotérmica (SOGE) se ha logrado destilar 31601 ml/día, a razón de 1317 ml/h bajo funcionamiento continuo a flujo constante de 7,09 L/min y temperatura constante del agua de entrada de 73 °C durante 24 horas (día+noche), en tanto que (Voropoulos et al., 2003) con un destilados solar con tanque de almacenamiento de agua caliente a 60 °C obtiene agua destilada a razón de 6 l/h o 144 l/día, mientras que (Yabroudi et al., 2011) indican que con un destilador solar tubular (DST) han desalado agua de mar produciendo 2,42 L/m² día con eficiencia de remoción mayor al 99 %, en tanto que con el DGS en modo de funcionamiento solo solar la productividad obtenida es de 5,81 L/m² día. Mientras que (Sathyamurthy et al., 2017) reportan en una revisión tecnológica que, en países como la India, Egipto, Irán y Jordania han desarrollado destiladores solares integrado a diferentes colectores solares para mejorar la productividad de agua destilada en el rango de (2,9 – 53,2) L/m² día con incrementos en la eficiencia energética entre (7,67 – 76,43) %.

Por otro lado, (Sengar et al., 2012) indican que con área de captación de 1 m^2 usando fibra de vidrio, con cobertores de pendiente de uno y doble vidrio se produce entre 1350 y 1550 mL/día, con el destilador bajo la forma de funcionamiento solo solar (SS) se ha obtenido 4649 ml/día de agua destilada, debido a que bajo esta forma de funcionamiento la destilación se inicia con temperatura inicial del agua geotermal de $73 \text{ }^\circ\text{C}$; con energía solar-geotermia (SOGÉ) 31601ml/día y con sólo energía geotérmica (SG) 29986 ml/día, con lo cual se acepta la hipótesis planteada. El uso de la energía geotérmica de baja entalpía a $73 \text{ }^\circ\text{C}$ proveniente como calor sensible de aguas geotermiales, permite incrementar el volumen de agua destilada en un factor de 6,48 respecto al funcionamiento solo con energía solar (SS) con un factor de productividad de 39501 ml/m²día; mientras que (Nandwani & Marin, 1986) indican que han obtenido con un destilador de cobertor de vidrio agua destilada entre 2 a 4 litros/m²día, mucho menor que el que produce el destilador desarrollado en la presente investigación, similarmente reportado por (Ugwuoke et al., 2006); la variación de temperatura ambiente y la precipitación de la zona andina de Tacna favorece la mayor producción de agua destilada, aspecto que es corroborado por (Torchia et al., 2014).

Con el DGS se puede destilar agua salobre y con altos contenidos metales pesados, y con la energía geotérmica de baja entalpía con ventajas relativas a lo indicado por (Polo & Mamani, 2013), (Alaudeen et al., 2014), (Zeroual et al., 2011) que con destiladores solares se puede destilar y desalar agua de mar para consumo humano bajo las condiciones climatológicas propias de cada lugar, que pueden producir desde unidades de litros hasta miles de metros cúbicos por día (Aburideh et al., 2012).

En tanto que, Rajesh & Chiranjeevi, (2024) recomiendan que a futuro para mejorar la eficiencia de la destilación térmica debe considerarse usar sistemas híbridos para aprovechar la energía térmica de baja calidad y reducir los impactos ambientales, integrando procesos con coogeneración, trigeneración y poligeneración, usar la inteligencia artificial para el dimensionamiento y optimización de sistema híbridos, explorar métodos eficaces para la eliminación de salmueras y líquidos residuales contaminantes, aprovechar las múltiples energías renovables y de calor residual y su almacenamiento para destilación continua y sostenible, y explorar tecnologías sostenibles e innovadoras que usen como fuente energética las energías renovables como la geotermia, biomasa, eólica y térmica oceánica; en concordancia con el destilador híbrido desarrollado que usa híbridamente dos fuentes energéticas renovables como la geotermia de baja entalpía y la solar, que funciona bajo las condiciones meteorológicas

extremas de la zona altoandina de la región Tacna para la remoción de arsénico e incrementar el volumen de agua destilada.

5.4 Caracterización térmica-energética

El perfil térmico del destilador geotérmico-solar (DGS), depende de la forma de funcionamiento bajo las dos fuentes energéticas usadas, cuando se utiliza la energía geotérmica-solar, la temperatura (T_2) en la base de la cubeta del destilador se incrementa en el día en unos $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ debido al efecto de la irradiancia solar incidente (G_i) sobre el plano del destilador, la temperatura del agua geotermal que ingresó al destilador fue de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual se mantiene constante las 24 horas del día, entre las 13:00 a 15:00 h la temperatura del agua en la bandeja se mantiene a $59\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio, mientras que la del vapor a $51\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en la superficie interior del cobertor de vidrio orientado al este a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; en tanto que (Rubio-Cerda et al., 2002) indican que entre las 14:00 a 16:00 h la temperatura del agua en un destilador solar de dos vertientes orientado al este alcanza $62\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el interior del cobertor $46\text{ }^{\circ}\text{C}$, estos valores son indicadores de la mayor productividad de agua destilada por el destilador desarrollado, corroborado por (Dsilva et al., 2016), (Torres & Mejia , 2016).

Un aspecto importante en lo referente a la eficiencia energética del DGS es que presenta una alta productividad diaria de agua potable ($\text{L}/\text{m}^2\text{día}$) en modo solar-geotermia (SOG) y solo geotermia (SG), mayor a los obtenidos con destiladores de placa plana, colector solar tubular, activo de multi efecto, colector concentrador, concentrador con base triple, con tubo integrado y fotovoltaico, cilíndrico parabólico de doble efecto, piramidal, pero menor al multi etapa evacuado que usan como fuente energética la energía solar, tal como lo sintetiza (Ravishankar et al., 2017).

El destilador bajo la forma de funcionamiento solar+geotérmico (SOG) produce en promedio $39,5\text{ L}/\text{m}^2\text{día}$, considerando que el consumo promedio per cápita urbano diario en el Perú es de $100\text{ L}/\text{día}$ (en el sector rural es mucho menos), se requeriría aproximadamente la producción de (2.53) destiladores SOG con un área de cubeta de 1 m^2 cada uno, que funcionen las 24 horas del día, para cubrir el requerimiento diario.

Si consideramos diez (10) viviendas compuestas cada una de cinco (5) personas, totalizando 50 personas con un consumo diario de 5000 litros, se requeriría 127 destiladores SOG de 1 m^2 , pero debe considerarse que el equipo utilizado fue con fines experimentales, para fines sociales debe de desarrollarse un modelo más funcional y de menor costo.

Por otro lado, el agua geotermal que ingresa a la cubeta del destilador es de 70,38 °C y la que sale de 67,53 °C al recorrer un metro de longitud, que nos indica que por cada metro de longitud del destilador la temperatura del agua geotermal disminuye 2,85 °C, cuyo calor sensible es utilizado para la evaporación y las pérdidas térmica por conducción, convección y radiación desde el interior al medio ambiente, lo que conllevaría a que para un sistema de 12 m de longitud y 0,8 m de ancho el agua de salida saldría a una temperatura de 36,18 °C, el cual produciría aproximadamente 379 L/día, de modo tal que para cubrir el consumo diario de 50 personas se requerirían 13 destiladores SOGE, cada uno con una superficie de 12mx0,8 m.

CONCLUSIONES

Se ha diseñado y construido un destilador híbrido geotérmico-solar de doble vertiente (DGS) experimental, único en el contexto mundial de la utilización de las energías renovables que funciona con dos fuentes energéticas renovables, la solar y geotermia de baja entalpía, bajo tres formas de funcionamiento: solar-geotermal (SOGE), solo geotermia (SG) y solo solar (SS), usando materiales que se adquieren en el mercado local, de bajo costo, simple tecnología y funcional, que reduce la concentración de arsénico de 9,56 a 0,029 mg/l, de agua geotermal, con eficiencia de remoción del 99,79%.

El volumen diario de agua destilada se ha incrementado de 4,605 con solo solar (SS) a 31601 ml/día con geotermal-solar (SOGE) en un factor 6,9, con una productividad promedio de 40818 ml/m²día y velocidad de destilación de 1317 ml/h, usando agua geotermal con temperatura de ingreso al destilador de 67 °C y flujo volumétrico constante de 7,30 L/min, la productividad se incrementa en un 18% cuando cae sobre el cobertor tres horas de lluvia y granizo.

La mayor eficiencia energética se presenta bajo la forma de funcionamiento solo geotermia (SG) con 36,76 %, seguido del solar-geotermia (SOGE) con 29,68 %, y bajo la forma solo solar (SS) 12,27 %.

Se ha desarrollado un destilador para obtener mayores volúmenes diarios de agua destilada, y reducir la concentración de arsénico, el cual puede contribuir a dotar de agua para consumo humano a partir de aguas geotermiales, y otros usos de la población altoandina de la región Tacna en concordancia con objetivos 3, 6, 7 y 13 del Desarrollo Sostenible (ODS), el cual puede ser replicado en otras zonas similares nacionales e internacionales para mejorar los indicadores socioeconómicos, la salud y calidad de vida poblacional.

RECOMENDACIONES

Considerando que en la zona andina de la región Tacna, se tienen identificadas más de 150 fuentes de aguas geotermales con temperaturas que varían entre (10 – 90) °C a diferentes flujos volumétricos, se recomienda realizar evaluaciones de destiladores geotérmicos-solares con diferentes diseños, tamaños y modulares para optimizar la productividad el volumen diario de agua destilada y en la posibilidad de implementar un proyecto social de apoyo al poblador altoandino.

Dado que las aguas geotermales altoandinas, poseen una composición química diversa de metales pesados y metaloides no aptas para el consumo humano, con concentraciones mayor a los máximos valores permisibles establecidos por la OMS y la DIRESA, se recomienda realizar un estudio integral de la reducción de metales pesados y otros parámetros físico-químico y bacteriológicos con el uso de destiladores geotérmicos-solares.

En la zona, en los seis campos geotermales el calor sensible entálpico de aguas geotermales de baja entalpía se disipa al medio ambiente, sin uso o aplicación alguna, en tanto que los pobladores que habitan en dicha zona de extrema pobreza regional, todos los años sufren las inclemencias de las heladas, previa investigación científica-tecnológica en situ se recomienda que dicha energía térmica debe ser utilizada para calefacción de ambientes, cultivo bajo invernaderos, secado de alimentos, recreación, proyectos productivos y otras aplicaciones.

REFERENCIAS

- Aburideh, H., Delioui, A., Abbad, B., Alaoui, F., Tassalit, D., & Tigrine, Z. (2012). An experimental study of a solar still: Application on the sea water desalination of Fouka. *Procedia Engineering*, 33, 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1227>
- Alarcón-Herrera, M. T., & Gutiérrez, M. (2022). Geogenic arsenic in groundwater: Challenges, gaps, and future directions. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 27). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100349>
- Alaudeen, A., Johnson, K., Ganasundar, P., Syed Abuthahir, A., & Srithar, K. (2014). Study on stepped type basin in a solar still. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 26(2), 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.05.002>
- Alfaro, C., Rueda-Gutiérrez, J. B., Casallas, Y., Rodríguez, G., & Malo, J. (2021). Approach to the geothermal potential of Colombia. *Geothermics*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102169>
- Ambriz-Díaz, V. M., Rubio-Maya, C., Chávez, O., Ruiz-Casanova, E., & Pastor-Martínez, E. (2021). Thermodynamic performance and economic feasibility of Kalina, Goswami and Organic Rankine Cycles coupled to a polygeneration plant using geothermal energy of low-grade temperature. *Energy Conversion and Management*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114362>
- Arellano Escudero, N. (2011). La Planta Solar de Desalación de Agua de las Salinas (1872) - literatura y memoria de una experiencia pionera. *Quaderns de Historia de La Ingeniería*, XII(1872), 229–251.
- Arregín Cortés, F. I. ., & Martín Dominguez, A. (2000). Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica En México*, 15(1), 22.
- Avendaño, E., Mamani, E., & Fabian, D. (2012). Remoción de arsénico del río Sama utilizando la Metodología de Hierro cero valente. *Ciencia y Desarrollo*.
- Barbier, E. (1997). Nature and technology of geothermal energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1(1–2), 1–69. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(97\)00001-4](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(97)00001-4)
- Barroso Manuel, Gil Luisa, A. S. (2016). Destilador solar para usos múltiples. *Tekhné*, 0(2).
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 446–463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>
- Bertani, R. (2012). Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report. *Geothermics*, 41(2012), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.10.001>
- Bertani, R. (2016). Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report. *Geothermics*, 60, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003>
- Boukar, M., & Harmim, A. (2004). Parametric study of a vertical solar still under desert climatic conditions. *Desalination*, 168(1–3), 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.165>
- Breeze, P., Vieira da Rosa, A., Doble, M., Gupta, H., Kalogirou, S., Maegaard, P., Pistoia, G., Roy, S., Sorensen, B., Storvick, T., Yang, S. T., & Kruthiventi, A. (2009). Renewable Energy Focus Handbook. In *Igarss 2014* (PRIMERA, Issue 1). Elsevier inC. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

- Bundschuh, J., Ghaffour, N., Mahmoudi, H., Goosen, M., Mushtaq, S., & Hoinkis, J. (2015). Low-cost low-enthalpy geothermal heat for freshwater production: Innovative applications using thermal desalination processes. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 43, pp. 196–206). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.102>
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J. S., Liu, C. W., López, D., Armienta, M. A., Guilherme, L. R. G., Cuevas, A. G., Cornejo, L., Cumbal, L., & Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. In *Science of the Total Environment* (Vol. 429, pp. 2–35). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>
- Bundschuh, J., Schneider, J., Alam, M. A., Niazi, N. K., Herath, I., Parvez, F., Tomaszewska, B., Guilherme, L. R. G., Maity, J. P., López, D. L., Cirelli, A. F., Pérez-Carrera, A., Morales-Simfors, N., Alarcón-Herrera, M. T., Baisch, P., Mohan, D., & Mukherjee, A. (2021). Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts. In *Science of the Total Environment* (Vol. 780). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146274>
- Caguao Yagua, A. J. (2013). Desarrollo de un modelo interactivo para la simulación de un destilador solar. *Perfiles*, 14–20.
- Carbajal Ascona, A., & Gonzales Fernandez. M. (2012). Propiedades y funciones biológicas del agua. *CSIC*, 33–45.
- Cárcel Carrasco, F. J., & Martínez Márquez, D. (2015). La energía geotérmica de baja entalpía. *3C Tecnología_Glosas de Innovación Aplicadas a La Pyme*, 4(3), 96–108. <https://doi.org/10.17993/3ctecno.2015.v4n3e15.96-108>
- Carolina Yabroudi, S., Cárdenas, C., Aldana, L., & Núñez Lenin Herrera Jos. (2011). Desalinización de agua empleando un destilador solar tubular. *Interciencia*, 36(10), 731–737.
- Carro Pérez, M. E., Peiretti, A., & Francisca, F. M. (2018). Energía geotérmica de baja entalpía en suelos loésicos: cálculo y diseño para caso de estudio. *Asades*, 22(4), 23–34.
- Castillo Tellez, M. (2008). *Desarrollo y análisis energético de destiladores solares de agua con convección natural y convección forzada*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castro de Esparza, M. L. (2006). Remoción Del Arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos. *Tercer Seminario Internacional Sobre Evaluación y Manejo de Las Fuentes de Agua de Bebida Contaminadas Con Arsénico, 20-24 June, 20*.
- Chaichan, M. T., & Kazem, H. A. (2015). Water solar distiller productivity enhancement using concentrating solar water heater and phase change material (PCM). *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.03.009>
- Chasseriaux, J. M. (1990). *Conversión térmica de la radiación solar* (Primera). Librería Agropecuaria S.A.
- Chávez Quijada, M. L., & Miglio Toledo, M. (2011). Remoción con arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. *Soc. Quím. Perú*, 77(4), 307–314.
- Christiansen, R. O., Clavel, F., Gonzalez, M., García, H. P. A., Ortiz, D. A., Ariza, J. P., Martínez, M. P., & Wohnlich, S. (2021). Low-enthalpy geothermal energy resources in the Central Andes of Argentina: A case study of the Pismanta system. *Renewable Energy*, 177, 1234–1252. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.065>

- Colmenares Angarita, S. M., & Pinzon Rangel, J. A. (2008). *Diseño, construcción y pruebas de un destilador solar*. Pontificia Bolivariana.
- Cornejo, L., Lienqueo, H., Arenas, M., Acarapi, J., Mansilla, H., & Jorge, Y. (2004). Remoción de arsenico de aguas naturales del rio Camarones y su utilización para consumo humano, mediante la tecnología SORAS Modificada-Hierro Cero. *Advances in Low-Cost Technologies for Disinfection, Decontamination and Arsenic Removal in Waters from Rural Communities of Latin America, January 2016*.
- Corroto, C., Iriel, ;, Cirelli, F., & Carrera, P. (2021). Arsenic and fluoride removal from water used in livestock production. *InVet*, 23(1), 01–08.
- Cruz Pauccara V., V. R. V., C. D. L. (2013). Boletín N° 56 caracterización y evaluación potencial geotérmico región Tacna. In *Ingemmet*.
- Cruz Pauccara, V., Vargas Rodríguez, V., & Cacya Dueñas, L. (2013). Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la región Tacna. In *Geodinámica e Ingeniería geológica: Vol. 56 Serie C* (Issue 56).
- Cruz Pauccara, V., Vargas Rodríguez, V., & Cacya Dueñas, L. (2014). Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región Moquegua. *INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, N° 58*, 155.
- De Paul, I. (2001). Comportamiento de un destilador tipo batea con pendiente alta en las cubiertas. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5, 9–13.
- Delgado Quezada, V., Altamirano Espinoza, M., & Bundschuh, J. (2020). Arsenic in geoenvironments of Nicaragua: Exposure, health effects, mitigation and future needs. *Science of the Total Environment*, 716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136527>
- Dev, R., Singh, H. N., & Tiwari, G. N. (2011). Characteristic equation of double slope passive solar still. *Desalination*, 267(2–3), 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.09.037>
- Dévora Isiorda, G., Gonzáles Enriquez, R., & Ruiz Cruz, S. (2013). Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua, IV* (3), 27–46.
- Ding, W. Q., Labiadh, L., Xu, L., Li, X. Y., Chen, C., Fu, M. L., & Yuan, B. (2023). Current advances in the detection and removal of organic arsenic by metal-organic frameworks. In *Chemosphere* (Vol. 339). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139687>
- Diresa. (2011). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Dirección General de Salud Ambiental Del Ministerio de Salud*, 46 p.
- Dsilva, W. R., Iniyani, S., Suganthi, L., & Davies, P. A. (2016). Solar stills: A comprehensive review of designs, performance and material advances. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 464–496. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.068>
- Dsilva Winfred Rufuss, D., Iniyani, S., Suganthi, L., & Davies, P. A. (2016). Solar stills: A comprehensive review of designs, performance and material advances. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 63, pp. 464–496). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.068>
- Dúcculli, E., Machesi, J., Barral, J., & Fasulo, A. (2016). Simulación numérica de un destilador solar asistido con colector acumulador. *Asades*, 12 (January 2008), 9.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2003). Solar Engineering of Thermal Processes. In *Journal of Solar Energy Engineering* (cuarta edi, Vol. 116). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1115/1.2930068>

- Fan, R., Jiang, Y., Yao, Y., Shiming, D., & Ma, Z. (2007). A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and groundwater advection. *Energy*, 32(11), 2199–2209. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.05.001>
- Fath, H. E. S., El-Samanoudy, M., Fahmy, K., & Hassabou, A. (2003). Thermaleconomic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations. *Desalination*, 159(1), 69–79. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)90046-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90046-4)
- Fonseca Fonseca, S., Rosales Rodríguez, J. C., Fonseca Acosta, F., & Miranda Perdono, E. (2011). Software para simular el comportamiento de destiladores solares de bandeja. *Centro de Investigaciones de Energía Solar*, 10.
- Fouillac, C., & Michard, G. (1981). Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10(1), 55–70. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(81\)90025-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(81)90025-0)
- Francisca, F. M., Evelín, M., & Pérez, C. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. In *Rev. Int. Contam. Ambie* (Vol. 30, Issue 2).
- Frick, S., Kaltschmitt, M., & Schröder, G. (2010). Life cycle assessment of geothermal binary power plants using enhanced low-temperature reservoirs. *Energy*, 35(5), 2281–2294. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.016>
- Gamarra, F., Medina, J., Lanchipa, W., Tamayo, R., & Sacari, E. (2022). Structural, Optical, and Arsenic Removal Properties of Sol–Gel Synthesized Fe-Doped TiO₂ Nanoparticles. *Nanomaterials*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/nano12193402>
- Gamboa, M. M., Iribarren, D., & Dufour, J. (2015). On the environmental suitability of high- and low-enthalpy geothermal systems. *Geothermics*, 53, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.03.012>
- Ghosal, P. S., Kattil, K. V., Yadav, M. K., & Gupta, A. K. (2018). Adsorptive removal of arsenic by novel iron/olivine composite: Insights into preparation and adsorption process by response surface methodology and artificial neural network. *Journal of Environmental Management*, 209, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.040>
- Gude, V. G. (2016). Geothermal source potential for water desalination - Current status and future perspective. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 57, pp. 1038–1065). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.186>
- Hu, B., Jia, X., Hu, J., Xu, D., Xia, F., & Li, Y. (2017). Assessment of heavy metal pollution and health risks in the soil-plant-human system in the Yangtze river delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph14091042>
- Huling, J. R., Huling, S. G., & Ludwig, R. (2017). Enhanced adsorption of arsenic through the oxidative treatment of reduced aquifer solids. *Water Research*, 123, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.064>
- IEG. (1987). *Energía Geotérmica*. (primera, p. 10). Secretaria de Energía.
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis, resumen para responsables de política. In *Nature* (Vol. 446, Issue 7137). OMM, INUMA. <https://doi.org/10.1038/446727a>

- Karydakakis, G., Arvanitis, A., Andritsos, N., & Fytikas, M. (2005). Low enthalpy geothermal fields in the Strymon Basin (Northern Greece). *Proceedings Worl Geothermal Congress, April, 24–29*.
- Khawaji, A. D., Kutubkhanah, I. K., & Wie, J. M. (2008). Advances in seawater desalination technologies. *Desalination, 221*(1–3), 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.067>
- Kristmannsdóttir, H., & Ármannsson, H. (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics, 32*(4–6), 451–461. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00052-X)
- Kumar, R., Patel, M., Singh, P., Bundschuh, J., Pittman, C. U., Trakal, L., & Mohan, D. (2019). Emerging technologies for arsenic removal from drinking water in rural and peri-urban areas: Methods, experience from, and options for Latin America. *Science of the Total Environment, 694*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.233>
- Litter, M. I., Alarcón-Herrera, M. T., Arenas, M. J., Armienta, M. A., Avilés, M., Cáceres, R. E., Cipriani, H. N., Cornejo, L., Dias, L. E., Cirelli, A. F., Farfán, E. M., Garrido, S., Lorenzo, L., Morgada, M. E., Olmos-Márquez, M. A., & Pérez-Carrera, A. (2012). Small-scale and household methods to remove arsenic from water for drinking purposes in Latin America. *Science of the Total Environment, 429*, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.004>
- Litter, M. I., Ingallinella, A. M., Olmos, V., Savio, M., Difeo, G., Botto, L., Farfán Torres, E. M., Taylor, S., Frangie, S., Herkovits, J., Schalamuk, I., González, M. J., Berardozzi, E., García Einschlag, F. S., Bhattacharya, P., & Ahmad, A. (2019). Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation and determination. *Science of the Total Environment, 676*, 756–766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.262>
- Litter, M. I., Sancha, A. M., & Ingallinella, A. M. (2010). Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas. *Cyted, 298*.
- Lobos, A. (2015). *Evaluación de factibilidad de tecnologías para desalinizar agua, por medio de energía solar térmica, en el norte de Chile*. 168.
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Los Riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteconoloía en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14*(2), 145. [https://doi.org/10.18684/BSAA \(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA (14)145-153)
- López, D. L., Bundschuh, J., Birkle, P., Armienta, M. A., Cumbal, L., Sracek, O., Cornejo, L., & Ormachea, M. (2012). Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Science of the Total Environment, 429*, 57–75. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.043>
- Lund, J. W. (2007). Development and utilization of geothermal resources. *Proceedings of ISES Solar World Congress 2007.Solar Energy and Human Settlement, 87*; 87–9595; 95. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_13
- Malaiyappan, P., & Elumalai, N. (2017). Solar still integrated with porous material. *Chemical and Pharmaceutical Sciences, december, 4*.
- Maldonado, E. (2002). *Estudio de Factibilidad de la implementación de un Destilador Solar como abastecedor de agua de bebida a partir de agua de mar para la Base Naval de Baltra, Galápagos*. (p. 199).
- Marchesi, J., Ducculi, E., Adaro, J., & Fasulo, A. (2008). Comparación del rendimiento de un destilador solar de batea básico respecto de un destilador asistido térmicamente. *Asades, 12* (Follari 1994), 63–69.

- MCLCP. (2017). *Situación de la calidad de agua para consumo humano en la región Tacna 2017*.
- Mijnlieff, H. F. (2020). Introduction to the geothermal play and reservoir geology of the Netherlands. In *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences* (Vol. 99). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/njg.2020.2>
- Mimfopoulos, M. K., Mylopoulos, N., & Katirtzoglou, K. G. (1977). a Qualitative-Quantitative Study of Water and Environmental Pollution at the Broader Area. *6th Congress of the Geographical Society of Greece*, 436–443. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4460.9040>
- Minasian, A. N., & Al-Karaghoul, A. A. (1992). Floating vertical solar still for desalination of marsh water. *Renewable Energy*, 2(6), 631–635. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(92\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(92)90029-3)
- Moser, M., Trieb, F., & Kern, J. (2010). Combined water and electricity production on industrial scale in the MENA countries with concentrating solar power. *EuroMED 2010*, 1–12.
- Muñoz-Carmona, F., Hickson, C., Cruz, V., Mendoza, M., Cardozo, M., De la Mata, U., Bona, P., Muñoz Carmona, F., Geociencias, C., Geol, I., (2014). *Resultados y recomendaciones Setiembre 2014*.
- Nandwani S. (2013). Destilador Solar, Construcción, funcionamiento y uso. *Universidad Nacional, Costa Rica*, 506, 1–19.
- Nandwani, S. S., & Marin Vonkoller, S. (1986). Estudio preliminar de tres modelos de destiladores solares para producir sal y agua potable. *Uniciencia*, 3, 59–69.
- OMS. (2006). Informe sobre la salud en el mundo 2006: colaboremos por la salud. *Organización Mundial de La Salud*, 219.
- Panchal, H. N., Patel, M. I., Patel, B., Doshi, M., & Professor, A. (2011). a Comparative Analysis of Single Slope Solar Still Coupled With Flat Plate Collector and Passive Solar Still. *Ijrras*, 7(2), 111–116.
- Perez Vasquez, P. (2013). *Evaluación de arsénico en orina de pobladores adultos del distrito de Ite, Tacna 2012*. U. N. Jorge Basadre Grohmann.
- Polo Bravo, C. A. (2013). *Potencial energético solar y su impacto ambiental en la región Tacna*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna.
- Polo, C., & Mamani, E. (2013). Diseño, construcción y caracterización de un Destilador Solar Tubular para desalinizar agua de mar. *Ciencia y Desarrollo*, 7.
- Prajapati, M., Shah, M., Soni, B., Parikh, S., Sircar, A., Balchandani, S., Thakore, S., & Tala, M. (2021). Geothermal-solar integrated groundwater desalination system: Current status and future perspective. In *Groundwater for Sustainable Development* (Vol. 12). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100506>
- Quispe, A., & Malpartida, V. (2017). Evaluación preliminar de la calidad del agua para consumo humano de la población del distrito de Sama y alternativas de tratamiento. *Ciencia & Desarrollo*, 2–5.
- Rajesh, S., & Chiranjeevi, C. (2024). Hybrid thermal desalination systems for sustainable development – A critical review. In *Solar Energy* (Vol. 270). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112364>
- Ramos, I. C., & Briozzo, C. (2010). *Modelización y Simulación Numérica de un Destilador Solar*. Universidad Nacional de Córdoba.

- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>
- Romero Chacón, O., & Martín Domínguez, I. R. (2013). *Simulación de un sistema de destilación solar adecuado con remoción de sales*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.
- Rubio-Cerda, E., Porta-Gándara, M. A., & Fernández-Zayas, J. L. (2002). Thermal performance of the condensing covers in a triangular solar still. *Renewable Energy*, 27(2), 301–308. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00196-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00196-3)
- Sabando Álvarez, A. V. (2017). *Diseño y construcción de un destilador solar para aguas residuales en la ciudad de Riobamba*. Escuela Superior Politécnica de Chimbrazo.
- Santos Jaimes Alfonso. (2009). Diseño, construcción y caracterización de un destilador solar de caseta. *Universidad Pontificia Bolivariana*, 10.
- Sathyamurthy, R., El-Agouz, S. A., Nagarajan, P. K., Subramani, J., Arunkumar, T., Mageshbabu, D., Madhu, B., Bharathwaaj, R., & Prakash, N. (2017). A Review of integrating solar collectors to solar still. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 1069–1097. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.223>
- Sengar, S. H., Khandetod, Y. P., & Mohod, A. G. (2012). New Innovation of low cost solar still. *European Journal of Sustainable Development*, 1(2), 315–352.
- Tarcan, G., & Gemici, Ü. (2003). Water geochemistry of the Seferihisar geothermal area, İzmir, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 126(3–4), 225–242. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00149-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00149-5)
- Tomaszewska, B., Bundschuh, J., Pająk, L., Dendys, M., Delgado Quezada, V., Bodzek, M., Armienta, M. A., Muñoz, M. O., & Kasztelewicz, A. (2020). Use of low-enthalpy and waste geothermal energy sources to solve arsenic problems in freshwater production in selected regions of Latin America using a process membrane distillation – Research into model solutions. *Science of the Total Environment*, 714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136853>
- Torchia Núñez, J. C., Cervantes de Gortari, J., & Porta Gándara, M. A. (2014). Thermodynamics of a Shallow Solar Still. *Energy and Power Engineering*, September, 246–265. <https://doi.org/10.4236/epe.2014.69022>
- Torres Martín, D., & Mejía Moncayo, C. (2016). Modelado y Simulación de un Destilador Solar. *Memorias CICI 2016 “Uniando Fronteras Desde La Orinoquía Para El Mundo,”* 6.
- Trieb M., F. (2005). Concentrating Solar Power for Seawater Desalination. In *DLR*. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.030>
- Ugwuoke, E., Ude, M., Osondu, L., Eze, N., & Ukwuani, S. (2006). *Performance Evaluation of Solar Still*. 4(09), 406–409.
- Ullah, I., & Rasul, M. G. (2019). Recent developments in solar thermal desalination technologies: A review. *Energies*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/en12010119>
- V. Lapus, A., & Neira Ramos, C. N. (2016). Experiencias sostenibles en el desarrollo de proyectos de generación eléctrica usando los recursos geotérmicos. In EPHS (Ed.), *Trayendo nuestra Experiencia en Geotermia al Perú* (p. 32). EDC Holdings SAC.

- Vargas Rodriguez, V., Antayhua Vera, Y., Cruz Pauccara, V., Rivera Porras, M., & Cacya Dueñas, L. (2012). *Estudio Geotérmico del Campo Calientes*. Ingemmet
- Vargas Rodriguez, V., Antayhua Vera, Y., Cruz Pauccara, V., Rivera Porras, M., & Chirif Rivera, H. (2012). *Estudio Geotérmico del campo Borateras*. Ingemmet
- Voropoulos, K., Mathioulakis, E., & Belessiotis, V. (2003). Experimental investigation of the behavior of a solar still coupled with hot water storage tank. *Desalination*, 156(1–3), 315–322. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00362-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00362-X)
- Wendt, D., Mines, G., Turchi, C., & Zhu, G. (2015). Geothermal risk reduction via geothermal/solar hybrid power plants: Final Report. In *Idaho National Laboratory* (pp. 1–823). <http://www.inl.gov>
- Yabroudi, S. C., Cárdenas, C., Aldana, L., Núñez, J., & Herrera, L. (2011). Desalinización de agua empleando un destilador solar tubular. *Interciencia*, 36(10), 731–737.
- Yanez, J., Fierro, V., Mansilla, H., Figueroa, L., Cornejo, L., & Barnes, R. M. (2005). Arsenic speciation in human hair: a new perspective for epidemiological assessment in chronic arsenicism. *Journal of Environmental Monitoring: JEM*, 7(12), 1335–1341. <https://doi.org/10.1039/b506313b>
- Zeroual, M., Bouguettaia, H., Bechki, D., Boughali, S., Bouchekima, B., & Mahcene, H. (2011). Experimental investigation on a double-slope solar still with partially cooled condenser in the region of Ouargla (Algeria). *Energy Procedia*, 6, 736–742. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.083>

ANEXOS

ANÁLISIS QUÍMICO DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO DE LA FUENTE DE AGUA GEOTERMAL DEL CAMPO GEOTERMAL DE BORATERAS



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José S/N Umacollo CAMPUS UNIVERSITARIO H-204/205 ☎ + 51 54 382038 ANEXO 1188
 ✉ laboratorioensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📄 Aptdo. 1356
 AREQUIPA - PERÚ



INFORME DE ENSAYO N° ANA27I23.005031

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Nombre del cliente : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann
Dirección del cliente : Av Miraflores N° s/n Cercado Ciudad Universitaria
RUC : 20147798834
Identificación del contacto : Carlos Polo Franco
Descripción de la muestra : Agua

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Condición del muestreo : Por el cliente
Tamaño de muestra : 500mL c/u
Fecha de recepción : 27/09/2023
Fecha de ejecución de ensayo : 27/09/2023 al 04/10/2023
Fecha de emisión de informe : 04/10/2023
Página : 1 de 1

I. ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO:

ANÁLISIS DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES (Arsenico total) Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry EPA METHOD 200.7 Revision 4.4	UNIDADES	RESULTADO
Agua Muestra I	mg/L	14,35
Agua Muestra II	mg/L	9,58
Agua Muestra III	mg/L	9,28

OBSERVACIONES:

- La información proporcionada por el cliente es de responsabilidad exclusiva del mismo.
- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento previo y transporte de la muestra hasta el ingreso al LECC son responsabilidad del solicitante y los resultados emitidos en el presente informe se refieren a la muestra tal como se recibió.
- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Ensayo y Control de Calidad

ANÁLISIS QUÍMICO DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO DEL AGUA DESTILADA BAJO FORMA DE FUNCIONAMIENTO SOLAR-GEOTERMAL (SOGE)



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

UPEL: San José s/n Universidad CAMPUS UNIVERSITARIO H-2040205 ☎ + 51 54 362008 AMB 03 1166
✉ laboratorioensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📍 01 Aptdo. 1390
AREQUIPA - PERÚ



INFORME DE ENSAYO N° ANA14K23.0050848

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Nombre del cliente : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann
Dirección del cliente : Av Miraflores N° s/n Cercado Ciudad Universitaria
RUC : 20147796634
Identificación del contacto : Carlos Polo Franco
Descripción de la muestra : Muestra 2 Soge

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Condición del muestreo : Por el cliente
Tamaño de muestra : 1500 mL
Fecha de recepción : 14/11/2023
Fecha de ejecución de ensayo : 14/11/2023 al 21/11/2023
Fecha de emisión de Informe : 23/11/2023
Página : 1 de 2

L ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO:

DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES (Aluminio, Antimonio, Arsénico, Boro, Bario, Berilio, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Estaño, Estroncio, Fósforo, Hierro, Litio, Magnesio, Manganeso, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Potasio, Selenio, Silicio, Sodio, Talio, Titanio, Vanadio, Zinc) Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry EPA Method 200.7 Rev. 4.4 1994

ANÁLISIS	UNIDADES	RESULTADO
Ag	mg/L	0,000
Al	mg/L	0,000
As	mg/L	0,029
B	mg/L	0,387
Ba	mg/L	0,008
Be	mg/L	0,003
Ca	mg/L	1,640
Cd	mg/L	0,000
Co	mg/L	0,015
Cr	mg/L	0,002
Cu	mg/L	0,007
Fe	mg/L	0,000
K	mg/L	0,683
Li	mg/L	0,027
Mg	mg/L	0,057
Mn	mg/L	0,000
Mo	mg/L	0,000
Na	mg/L	4,074
Ni	mg/L	0,001
P	mg/L	0,144
Pb	mg/L	0,008
Sb	mg/L	0,000
Se	mg/L	0,003
Si	mg/L	11,610
Sn	mg/L	0,017
Sr	mg/L	0,003



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José s/n Unicentro CAMPUS UNIVERSITARIO H-264026 • T: 51 54 362038 AMÉRICO 1189
 E: laboratorio@ensayo@ucsm.edu.pe • I: http://www.ucsm.edu.pe • D: Apúta, 1200
 AREQUIPA - PERÚ



INFORME DE ENSAYO N° ANA14K23.005084B

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Nombre del cliente : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann
Dirección del cliente : Av Miraflores N° s/n Mercado Ciudad Universitaria
RUC : 20147796634
Identificación del contacto : Carlos Polo Franco
Descripción de la muestra : Muestra 2 Soge

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Condición del muestreo : Por el cliente
Tamaño de muestra : 1500 mL
Fecha de recepción : 14/11/2023
Fecha de ejecución de ensayo : 14/11/2023 al 21/11/2023
Fecha de emisión de informe : 23/11/2023
Página : 2 de 2

Ti	mg/L	0,041
Ti	mg/L	0,015
V	mg/L	0,013
Zn	mg/L	0,000

OBSERVACIONES:

- La información proporcionada por el cliente es de responsabilidad exclusiva del mismo.
- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento previo y transporte de la muestra hasta el ingreso al LECC son responsabilidad del solicitante y los resultados emitidos en el presente informe se refieren a la muestra tal como se recibió.
- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Ensayo y Control de Calidad.



Firmado digitalmente por:
 RICARDO ALONSO ABRIL
 RUC: 20141637041

Motivo:
 Fecha: 23/11/2023 12:08:09-0500

ANÁLISIS QUÍMICO DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO DEL AGUA DESTILADA BAJO FORMA DE FUNCIONAMIENTO SOLO SOLAR (SS)



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

U.C.S.M. San José S/N Unasullo CAMPUS UNIVERSITARIO H- 2040208 | T: 51 84 382008 | FAX: 51 84 382008 | A.M.B. 11 601
laboratorio@ucsm.edu.pe | http://www.ucsm.edu.pe | gD Apito, 1350
AREQUIPA - PERÚ



INFORME DE ENSAYO N° ANA14K23.005084C

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Nombre del cliente : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann
Dirección del cliente : Av Miraflores N° sin Cercado Ciudad Universitaria
RUC : 20147796634
Identificación del contacto : Carlos Polo Franco
Descripción de la muestra : Muestra 3 Solo solar

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Condición del muestreo : Por el cliente
Tamaño de muestra : 1500 mL
Fecha de recepción : 14/11/2023
Fecha de ejecución de ensayo : 14/11/2023 al 21/11/2023
Fecha de emisión de informe : 23/11/2023
Página : 1 de 2

L ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO:

DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES (Aluminio, Antimonio, Arsénico, Boro, Bario, Berilio, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Estaño, Estroncio, Fósforo, Hierro, Litio, Magnesio, Manganeso, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Potasio, Selenio, Silicio, Sodio, Talio, Titanio, Vanadio, Zinc) Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry EPA Method 200.7 Rev. 4.4 1994.

ANÁLISIS	UNIDADES	RESULTADO
Ag	mg/L	0,000
Al	mg/L	0,000
As	mg/L	0,029
B	mg/L	0,308
Ba	mg/L	0,008
Be	mg/L	0,003
Ca	mg/L	1,551
Cd	mg/L	0,000
Co	mg/L	0,015
Cr	mg/L	0,002
Cu	mg/L	0,008
Fe	mg/L	0,000
K	mg/L	0,329
Li	mg/L	0,028
Mg	mg/L	0,150
Mn	mg/L	0,001
Mo	mg/L	0,000
Na	mg/L	3,870
Ni	mg/L	0,002
P	mg/L	0,153
Pb	mg/L	0,007
Sb	mg/L	0,000
Se	mg/L	0,002
Si	mg/L	9,134
Sn	mg/L	0,017
Sr	mg/L	0,005



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José s/n Universidad Católica Universitaria H-08028 ☎ + 51 54 382088 ANEXO 11 68
 ✉ laboratorioensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📍 Apdo. 1380
 AREQUIPA - PERU



INFORME DE ENSAYO N° ANA14K23.006084C

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Nombre del cliente : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann
Dirección del cliente : Av Miraflores N° s/n Cercado Ciudad Universitaria
RUC : 20147796634
Identificación del contacto : Carlos Polo Franco
Descripción de la muestra : Muestra 3 Solo solar

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Condición del muestreo : Por el cliente
Tamaño de muestra : 1500 mL
Fecha de recepción : 14/11/2023
Fecha de ejecución de ensayo : 14/11/2023 al 21/11/2023
Fecha de emisión de Informe : 23/11/2023
Página : 2 de 2

Ti	mg/L	0,041
Ti	mg/L	0,015
V	mg/L	0,014
Zn	mg/L	0,000

OBSERVACIONES:

- La información proporcionada por el cliente es de responsabilidad exclusiva del mismo.
- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento previo y transporte de la muestra hasta el ingreso al LECC son responsabilidad del solicitante y los resultados emitidos en el presente informe se refieren a la muestra tal como se recibió.
- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Ensayo y Control de Calidad.



Firma digitalmente por:
 RICARDO ALONSO ABRIL
 RIA NIREC/DNI 298 51987
 RUC:20141637941
 Activo
 Fecha: 23/11/2023 12:08:20-0800

ANÁLISIS QUÍMICO DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO DEL AGUA DESTILADA BAJO FORMA DE FUNCIONAMIENTO SOLO GEOTERMAL (SG)



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José S/N Urbacito CAMPUS UNIVERSITARIO H-206205 ☎ + 51 54 362088 ANEXO 1166
✉ laboratorioensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📄 Apdo. 1390
AREQUIPA - PERÚ



INFORME DE ENSAYO N° ANA14K23.005084D

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Nombre del cliente : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann
Dirección del cliente : Av Miraflores N° s/n Cercado Ciudad Universitaria
RUC : 20147796634
Identificación del contacto : Carlos Polo Franco
Descripción de la muestra : Muestra 4 Solo geot

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Condición del muestreo : Por el cliente
Tamaño de muestra : 1500 mL
Fecha de recepción : 14/11/2023
Fecha de ejecución de ensayo : 14/11/2023 al 21/11/2023
Fecha de emisión de informe : 23/11/2023
Página : 1 de 2

L ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO:

DETERMINACIÓN DE METALES TOTALES (Aluminio, Antimonio, Arsénico, Boro, Bario, Berilio, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Estaño, Estroncio, Fósforo, Hierro, Litio, Magnesio, Manganeso, Molibdeno, Níquel, Plata, Plomo, Potasio, Selenio, Silicio, Sodio, Talio, Titanio, Vanadio, Zinc) Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry EPA Method 200.7 Rev. 4.4 1994

ANÁLISIS	UNIDADES	RESULTADO
Ag	mg/L	0,000
Al	mg/L	0,000
As	mg/L	0,039
B	mg/L	0,392
Ba	mg/L	0,008
Be	mg/L	0,003
Ca	mg/L	1,643
Cd	mg/L	0,000
Co	mg/L	0,015
Cr	mg/L	0,002
Cu	mg/L	0,008
Fe	mg/L	0,000
K	mg/L	0,481
Lj	mg/L	0,042
Mg	mg/L	0,123
Mn	mg/L	0,004
Mo	mg/L	0,000
Na	mg/L	5,422
Ni	mg/L	0,002
P	mg/L	0,148
Pb	mg/L	0,006
Sb	mg/L	0,000
Se	mg/L	0,002
Si	mg/L	10,770
Sn	mg/L	0,012
Sr	mg/L	0,007



UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
FACULTAD DE CIENCIAS FARMACEUTICAS, BIOQUIMICAS Y BIOTECNOLOGICAS
LABORATORIO DE ENSAYO Y CONTROL DE CALIDAD

Urb. San José 574 Unasanta CAMPUS UNIVERSITARIO H-2040205 ☎ + 51 (0) 2020084000 1189
 ✉ laboratorioensayo@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe 📍 D. Aptdo. 1200
 AREQUIPA - PERÚ



INFORME DE ENSAYO N° ANA14K23.005084D

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Nombre del cliente : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann
Dirección del cliente : Av Miraflores N° sin Cercado Ciudad Universitaria
RUC : 20147796634
Identificación del contacto : Carlos Polo Franco
Descripción de la muestra : Muestra 4 Solo geot

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Condición del muestreo : Por el cliente
Tamaño de muestra : 1500 mL
Fecha de recepción : 14/11/2023
Fecha de ejecución de ensayo : 14/11/2023 al 21/11/2023
Fecha de emisión de informe : 23/11/2023
Página : 2 de 2

Ti	mg/L	0,041
Ti	mg/L	0,016
V	mg/L	0,012
Zn	mg/L	0,000

OBSERVACIONES:

- La información proporcionada por el cliente es de responsabilidad exclusiva del mismo.
- El muestreo, las condiciones de muestreo, tratamiento previo y transporte de la muestra hasta el ingreso al LECC son responsabilidad del solicitante y los resultados emitidos en el presente informe se refieren a la muestra tal como se recibió.
- Los resultados emitidos en el presente informe se relacionan únicamente a las muestras ensayadas y no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Este documento no debe ser reproducido, sin autorización escrita del Laboratorio de Ensayo y Control de Calidad.



Firmado digitalmente por:
 RICARDO ALONSO ABRIL
 RIA NIREZ DNI 29851987
 RUC:20141637941
 Motivo:
 Fecha: 23/11/2023 12:08:33-0900

**EFICENCIA DE REDUCCIÓN DE METALES PESADOS DE AGUAS
GEOTERMALES DE BAJA ENTALPÍA CON EL DESTILADOR GEOTÉRMICO-
SOLAR**

ELEMENTO	FUENTE (mg/l)	SOGE (mg/l)	SS (mg/l)	SG (mg/l)	LMP (mg/l)	EFICIENCIA DE REDUCCION (%)
Arsénico	2,987	0,029	0,029	0,039	0,010	99,99
Boro	37,090	0,387	0,308	0,392	1,500	99,99
Bario	0,100	0,008	0,008	0,008	0,700	92,00
Calcio	32,370	1,640	1,551	1,643	(0-100)	94,93
Potasio	109,9	0,683	0,329	0,481	----	99,38
Litio	9,735	0,027	0,028	0,042	----	99,72
Magnesio	3,260	0,057	0,150	0,123	----	98,25
Manganeso	0,079	0	0,001	0,004	0,400	100,00
Sodio	710,20	4,074	3,870	5,422	200	99,43
Fósforo	0,161	0,144	0,153	0,148	----	10,56
Silicio	14,340	11,610	9,134	10,770		19,04
Estroncio	0,608	0,003	0,005	0,007	----	99,51

LMP: Límite Máximo Permisible OMS-DIGESA