

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

RECUPERACIÓN DE AGUA DE LA SALMUERA RESIDUAL
DE ACEITUNA VERDE MEDIANTE UN DESTILADOR
SOLAR CON ACUMULADOR DE CALOR EN
LA CIUDAD DE TACNA

TESIS

Presentada por:

Bach. Nelly Maribel Mamani Atajo

Para optar por el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

TACNA - PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias Agropecuarias

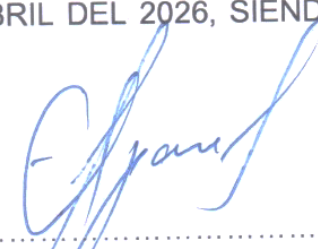
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

TESIS

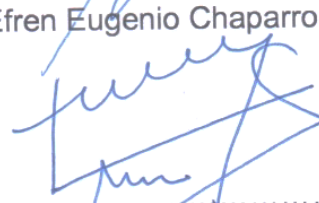
**RECUPERACIÓN DE AGUA DE LA SALMUERA RESIDUAL
DE ACEITUNA VERDE MEDIANTE UN DESTILADOR
SOLAR CON ACUMULADOR DE CALOR EN
LA CIUDAD DE TACNA**

SUSTENTADA Y APROBADA EL 21 DE ABRIL DEL 2026, SIENDO EL
JURADO CALIFICADOR:

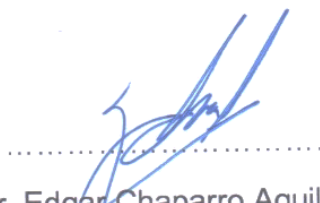
PRESIDENTE:


.....
Dr. Efrén Eugenio Chaparro Montoya

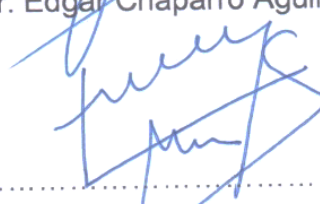
SECRETARIO:


.....
Dr. Hugo Alfredo Torres Muro

VOCAL:


.....
Dr. Edgar Chaparro Aguilar

ASESOR:


.....
Dr. Hugo Alfredo Torres Muro

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Dr. Hugo Alfredo Torres Muro, en mi condición de asesor acreditado por la **Resolución de Facultad N° 9199-2024-FCAG** de la tesis titulada: "Recuperación de agua de la salmuera residual de aceituna verde mediante un destilador solar con acumulador de calor en la ciudad de Tacna", presentada por Bach. Nelly Maribel Mamani Atajo, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental para optar el título de Ingeniero Ambiental.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual considerando que, según la revisión actualizada, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual **TURNITIN** cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es del **8 %**, por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada y está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los tramites respectivos.

Dr. Hugo Alfredo Torres Muro
DNI: 47819311
ASESOR



Bach. Nelly Maribel Mamani Atajo
DNI: 74587093



DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a mi familia, por su apoyo constante, comprensión y motivación a lo largo de mi formación profesional. Asimismo, a todas las personas que confiaron en mí y contribuyeron, directa o indirectamente, al logro de este objetivo académico.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG) y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por la formación académica brindada a lo largo de mis estudios. De manera especial, agradezco al Dr. Hugo Alfredo Torres Muro, asesor de tesis, por su orientación, apoyo y sugerencias durante el desarrollo de la presente investigación. Asimismo, extendo mi agradecimiento al Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT) y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la UNJBG, por facilitar la información, los materiales y las condiciones necesarias para la ejecución del trabajo experimental.

CONTENIDO

	Pág.
CERTIFICADO DE SIMILITUD	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Formulación y sistematización del problema.....	7
1.2.1 Interrogante general	7
1.2.2 Interrogantes específicas	7
1.3 Delimitación de la investigación	8
1.3.1 Delimitación temporal.....	8
1.3.2 Delimitación espacial.....	8
1.3.3 Delimitación teórica.....	9
1.4 Justificación.....	9

1.4.1	Justificación social.....	9
1.4.2	Justificación económica	9
1.4.3	Justificación ambiental	10
1.5	Alcances y limitaciones	10
CAPÍTULO II OBJETIVOS E HIPÓTESIS		
2.1	Objetivos	12
2.1.1	Objetivo general	12
2.1.2	Objetivos específicos	12
2.2	Hipótesis	13
2.2.1	Hipótesis general	13
2.2.2	Hipótesis específicas.....	13
2.3	Variables	14
2.3.1	Diagrama de variables	14
2.3.2	Operacionalización de variables	15
CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL		
3.1	Conceptos generales y definiciones.....	16
3.1.1	Destilador solar	16
3.1.2	Destilación solar	16
3.1.3	Salmuera residual de aceituna verde	16
3.1.4	Acumulador de calor	17
3.1.5	Eficiencia térmica	17
3.1.6	Factor de productividad.....	17

3.1.7 Comportamiento térmico	17
3.1.8 Calidad del agua	18
3.1.9 Condiciones climáticas.....	18
3.1.10 Radiación solar	18
3.1.11 Temperatura ambiente	19
3.2 Enfoques teóricos – técnicos	19
3.2.1 Destilación solar	19
3.2.2 Eficiencia de un destilador solar.....	22
3.2.3 Factor de productividad de un destilador solar.....	22
3.2.4 Parámetros de funcionamiento de un destilador solar	23
3.2.5 Acumuladores de calor.....	25
3.2.6 Aguas residuales de salmuera de aceituna.....	27
3.2.7 Reglamento y estándar de calidad del agua	31
3.3 Marco referencial	34
3.3.1 Nivel internacional.....	34
3.3.2 Nivel nacional.....	37
3.3.3 Nivel regional	39
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
4.1 Tipo de investigación.....	42
4.2 Nivel de investigación.....	42
4.3 Diseño de investigación	42
4.4 Población y muestra.....	43

4.4.1	Población	43
4.4.2	Muestra	43
4.5	Técnicas aplicadas en la recolección de la información.....	44
4.5.1	Desarrollo de la investigación	45
4.6	Instrumentos de medición	54
4.6.1	Materiales y equipos	54
4.7	Métodos estadísticos utilizados.....	55
CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
5.1	Resultados	56
5.1.1	Evaluación de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con de acumulador calor.....	56
5.1.2	Factor de productividad del destilador construido con acumulador de calor	70
5.1.3	Análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas de las muestras de agua residual del procesamiento de aceituna verde antes y después de la destilación.....	74
5.2	Discusión de resultados	77
5.2.1	Evaluación de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con acumulador de calor.....	77
5.2.2	Factor de productividad del destilador construido con acumulador de calor	80
5.2.3	Análisis de características fisicoquímicas y microbiológicas	83

CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXOS.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de variables.....	15
Tabla 2. Parámetros que influyen en destiladores solares.....	24
Tabla 3. Materiales utilizados para la acumulación de calor en destiladores solares.....	26
Tabla 4. Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica y microbiológica de calidad del agua para consumo humano.....	32
Tabla 5. ECA para aguas, categoría 1 - subcategoría A y categoría 3.....	33
Tabla 6. Factores y repeticiones de la investigación.....	43
Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados...	53
Tabla 8. Análisis de varianza de la temperatura del agua almacenada en la base de la cubeta del destilador solar en función del tipo de acumulador y la profundidad.....	65
Tabla 9. Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) de la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$) almacenada en la base de la	

cubeta del destilador solar a diferentes profundidades de agua residual de salmuera de aceituna.....	66
Tabla 10. Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) de la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$) almacenada en la base de la cubeta del destilador solar: Interacción de factores.....	67
Tabla 11. Análisis de varianza de la eficiencia en función del tipo de acumulador y la profundidad.....	69
Tabla 12. Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) de la eficiencia (%) del destilador solar: Interacción de factores.	70
Tabla 13. Análisis de varianza del factor de productividad del destilador solar en función del tipo de acumulador y la profundidad.....	72
Tabla 14. Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) del factor de productividad ($\text{L}/\text{m}^2\text{día}$) a diferentes profundidades de agua residual de salmuera de aceituna.....	73
Tabla 15. Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) del factor de productividad ($\text{L}/\text{m}^2\text{día}$): Interacción de factores.....	73
Tabla 16. Análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas de muestras de agua residual del procesamiento de aceituna verde antes y después de la destilación solar.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de variables de estudio.....	14
Figura 2. Sistema de destilación solar de una vertiente y sus partes....	21
Figura 3. Diagrama de las etapas principales en el desarrollo del trabajo de investigación	45
Figura 4. Dimensiones del destilador solar de una vertiente	47
Figura 5. Componentes del destilador solar	48
Figura 6. Ubicación de los puntos de monitoreo	49
Figura 7. Variación de temperatura del destilador solar con grava de 1 cm de profundidad en función de las horas del día e irradiancia solar (W/m^2), promedio del 22 al 25 de septiembre de 2025	58
Figura 8. Variación de temperatura del destilador solar con grava de 3 cm de profundidad en función de las horas del día e irradiancia solar (W/m^2), promedio del 28 al 30 de septiembre y 2 de octubre de 2025.....	60
Figura 9. Variación de temperatura del destilador solar con grava volcánica de 1 cm de profundidad en función de las horas del día e irradiancia solar (W/m^2), promedio del 9 al 12 de octubre de 2025	62

Figura 10. Variación de temperatura del destilador solar con grava volcánica de 3 cm de profundidad en función de las horas del día e irradiancia solar (W/m^2), promedio del 13 al 15 y 17 de octubre de 2025	64
Figura 11. Eficiencia del destilador solar con acumulador de calor y a diferentes profundidades.....	68
Figura 12. Volumen recuperado de agua de la salmuera residual de aceituna verde mediante destilación solar con acumulador de calor (L/día).....	71

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Matriz de consistencia.....	102
Anexo 2. Panel fotográfico	103
Anexo 3. Informe de análisis de laboratorio	103

RESUMEN

La generación de salmuera residual del procesamiento de aceituna verde representa un problema ambiental en la ciudad de Tacna debido a su elevada concentración de sales y compuestos orgánicos que, al ser dispuestos sin tratamiento adecuado, pueden contaminar suelos y aguas subterráneas. La investigación tuvo como objetivo evaluar la recuperación de agua de la salmuera residual de aceituna verde mediante un destilador solar con acumulador de calor en la ciudad de Tacna. El estudio fue de tipo experimental con enfoque cuantitativo; se diseñó y construyó un destilador solar con un área efectiva de 0,60 m², evaluado mediante un diseño factorial 2 × 2, considerando el tipo de acumulador de calor (grava y grava volcánica) y la profundidad de la salmuera residual (1 y 3 cm). Los resultados mostraron que el mejor desempeño se obtuvo con grava y 1 cm de profundidad, alcanzando una eficiencia máxima de 37,87 % y una producción de 2,15 L/día (factor de productividad de 3,58 L/m²·día). Además, se registró una remoción superior al 99 % de sólidos disueltos, turbidez, salinidad y conductividad eléctrica; así como una reducción de coliformes totales y fecales hasta < 1,8 NMP/100 ml, cumpliendo con la normativa para agua de consumo humano. En conclusión, el destilador solar evaluado constituye una alternativa tecnológica viable para la

recuperación de agua a partir de salmuera residual de aceituna verde en zonas con alta radiación solar como Tacna.

Palabras clave: Destilador solar, salmuera residual, acumulador de calor, factor de productividad, recuperación de agua.

.

ABSTRACT

The generation of residual brine from green olive processing poses an environmental problem in the city of Tacna due to its high concentration of salts and organic compounds, which, if disposed of without proper treatment, can contaminate soil and groundwater. The research aimed to evaluate the recovery of water from the residual brine of green olives using a solar still with a heat accumulator in the city of Tacna. The study was experimental with a quantitative approach; a solar still with an effective area of 0,60 m² was designed and built, and evaluated using a 2 × 2 factorial design, considering the type of heat accumulator (gravel and volcanic gravel) and the depth of the residual brine (1 and 3 cm). The results showed that the best performance was obtained with gravel and a depth of 1 cm, achieving a maximum efficiency of 37,87 % and a production of 2,15 L/day (productivity factor of 3,58 L/m²·day). Furthermore, a removal rate of over 99% was recorded for dissolved solids, turbidity, salinity, and electrical conductivity; as well as a reduction of total and fecal coliforms to < 1,8 MPN/100 ml, meeting the standards for drinking water. In conclusion, the solar still evaluated constitutes a viable technological alternative for water recovery from green olive brine in areas with high solar radiation such as Tacna.

Keywords: Solar still, waste brine, heat accumulator, productivity factor, water recovery.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) la disponibilidad limitada de agua dulce representa uno de los principales problemas ambientales a nivel global, afectando especialmente a regiones áridas y semiáridas, donde la presión sobre los recursos hídricos se incrementa debido al crecimiento poblacional, el desarrollo industrial y el cambio climático (OMS, 2023). A escala mundial, se estima que más de 2 200 millones de personas no cuentan con acceso seguro a agua potable, situación que compromete la salud pública y el desarrollo sostenible de las comunidades (OMS, 2023).

De manera paralela, la actividad agroindustrial genera importantes volúmenes de residuos líquidos con características fisicoquímicas complejas, cuyo manejo inadecuado puede generar impactos negativos sobre el ambiente (Dermeche et al., 2013). Entre estas actividades, el procesamiento de aceituna verde destaca por la generación de salmuera residual con elevadas concentraciones de sales, materia orgánica y compuestos fenólicos, lo que dificulta su tratamiento mediante tecnologías convencionales (Miranda, 2018).

Frente a esta problemática, la destilación solar se ha consolidado como una alternativa para la purificación y recuperación de agua a partir de

efluentes salinos, debido a su bajo costo operativo, simplicidad constructiva y uso de energía renovable (Al-Mezeini et al., 2023; Santos et al., 2017). No obstante, la eficiencia de los destiladores solares convencionales puede verse limitada durante periodos de baja radiación solar (Karthick et al., 2022).

En este contexto, la presente investigación evalúa el desempeño de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con acumulador de calor en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual del procesamiento de aceituna verde. El estudio considera la determinación del volumen de agua recuperada, eficiencia y el análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua antes y después del proceso de destilación.

En concordancia con los objetivos planteados, el presente trabajo de investigación se organiza en cinco capítulos. En el Capítulo I se desarrolla el planteamiento del problema, incluyendo su formulación, sistematización, delimitación, justificación y limitaciones del estudio. El Capítulo II expone los objetivos, hipótesis y variables de investigación. El Capítulo III presenta el marco teórico y conceptual que sustenta el estudio. El Capítulo IV describe la metodología empleada, detallando el diseño experimental, los procedimientos y el análisis estadístico. Finalmente, el Capítulo V expone

los resultados obtenidos y su discusión, culminando con las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

La agroindustria de la aceituna verde constituye una actividad económica relevante en la región de Tacna; sin embargo, su proceso de elaboración genera grandes volúmenes de salmuera residual como subproducto de las etapas de fermentación y conservación del fruto. Durante el año 2015, la producción de aceitunas en la región alcanzó aproximadamente 19 742,4 toneladas, de las cuales 11 845,44 toneladas correspondieron a aceituna verde estilo sevillano, demandando un consumo de 11 844,86 m³ de agua en el proceso productivo (Del Pino, 2016). Como resultado, se generaron volúmenes significativos de aguas residuales, incluyendo 107 264 m³ de salmuera residual, cuyo manejo inadecuado representa un problema ambiental relevante.

Diversos estudios han evidenciado que la salmuera residual de aceituna verde presenta una composición fisicoquímica compleja, caracterizada por altas concentraciones de sales, sólidos disueltos totales, compuestos fenólicos y restos de hidróxido de sodio, lo que genera valores elevados de pH y conductividad eléctrica (Miranda, 2018). La disposición inadecuada de este efluente puede provocar procesos de salinización del

suelo, pérdida de fertilidad agrícola y alteraciones en los ecosistemas locales (Miranda, 2018).

En la región de Tacna, la gestión de estos residuos líquidos agroindustriales se ve agravada por la limitada disponibilidad de recursos hídricos, asociada a su clima árido. A nivel nacional, Tacna ocupa el último lugar a nivel de disponibilidad hídrica, con solo 355 hm³/año, lo que representa el 0,01 % de la disponibilidad hídrica del país (VIDENZA, 2024). Durante el periodo 2012-2022, Tacna recibió en promedio el 0,1 % de las lluvias del país, situándola entre las cinco regiones con menores precipitaciones (VIDENZA, 2024). De acuerdo con el INEI (2023) el 2022 hubo un incremento en la demanda hídrica, de los cuales el 72,9 % correspondió al uso consuntivo, el cual está constituido principalmente por el uso agrario (74,5 %), seguido por los usos poblacional (15,6 %) y minero (9,9 %). La región de Tacna cuenta con un elevado potencial de radiación solar, según señala Polo (2013) la energía solar global incidente sobre superficie horizontal en la Región Tacna es de $6,04 \pm 0,36$ kWh/m².día en promedio anual. No obstante, este recurso aún no ha sido plenamente aprovechado para el tratamiento sostenible de efluentes agroindustriales.

En tal sentido, los destiladores solares se presentan como una alternativa tecnológica ambientalmente viable para el tratamiento de salmueras, permitiendo la separación de sales y contaminantes mediante

procesos de evaporación y condensación impulsados por energía renovable (Santos et al., 2017). No obstante, uno de los principales inconvenientes de los destiladores solares convencionales es la disminución de su rendimiento durante periodos de baja radiación solar y durante las horas nocturnas.

Ante esta limitación, diferentes investigaciones han evaluado la incorporación de materiales con capacidad de almacenamiento térmico (Karthick et al., 2022). A nivel nacional y regional, investigaciones desarrolladas en Tacna han demostrado la viabilidad del uso de destiladores solares para la recuperación de agua, reportando producciones diarias que varían entre 0,9 y 1,34 L/día, dependiendo del diseño y los materiales utilizados (Rodríguez, 2021; Sanga, 2023). Sin embargo, estos estudios también evidencian la necesidad de optimizar los parámetros de operación y el uso de sistemas de almacenamiento térmico para incrementar la eficiencia de producción, especialmente cuando se trabaja con aguas residuales de alta salinidad y carga orgánica (Sanga, 2023).

En este contexto, la presente investigación se orienta a determinar el factor de productividad de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con acumulador de calor en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde en la ciudad de Tacna. Para ello, se analiza el

desempeño del sistema en términos de volumen de agua recuperada, eficiencia y calidad fisicoquímica y microbiológica del agua obtenida, considerando las condiciones climáticas locales.

1.2 Formulación y sistematización del problema

1.2.1 Interrogante general

¿Cuál es el desempeño del destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual del procesamiento de aceituna verde en la ciudad de Tacna?

1.2.2 Interrogantes específicas

- ¿Cuál es la eficiencia del destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde?
- ¿Cuál es el factor de productividad del destilador solar tipo cubeta considerando el uso de acumuladores de calor en la recuperación de agua?
- ¿Cómo varían las características fisicoquímicas y microbiológicas de la salmuera residual de aceituna verde antes y después del proceso de recuperación de agua mediante destilación solar con acumulador de calor?

1.3 Delimitación de la investigación

1.3.1 Delimitación temporal

La obtención de los datos experimentales se desarrolló durante un período de 96 días, comprendido entre el 22 de septiembre y el 6 de noviembre del año 2025. Durante este intervalo se realizaron las evaluaciones del destilador solar tipo cubeta de una vertiente, considerando profundidades de agua de salmuera residual de aceituna verde de 1 cm y 3 cm, así como el uso de acumuladores de calor de grava y grava volcánica.

1.3.2 Delimitación espacial

La presente investigación se llevó a cabo en el Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT), órgano perteneciente a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, donde se realizó la fase experimental correspondiente a la operación del destilador solar. Asimismo, los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua se efectuaron en el Laboratorio de Análisis de Aguas de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, ubicado en la Sede Los Granados, en el distrito de Tacna, provincia y región de Tacna, durante el año 2025.

1.3.3 Delimitación teórica

La investigación se delimitó teóricamente al estudio de la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde mediante el uso de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con acumulador de calor, abordando conceptos relacionados con la destilación solar, eficiencia, factor de productividad, almacenamiento térmico y calidad fisicoquímica y microbiológica del agua recuperada.

1.4 Justificación

1.4.1 Justificación social

Desde el punto de vista social, la construcción, instalación y mantenimiento de destiladores solares permitirían la generación de empleo local asociado a la fabricación, implementación y operación de esta tecnología. Asimismo, el uso de destiladores solares podría contribuir a fortalecer capacidades técnicas locales y a promover el desarrollo sostenible en la región.

1.4.2 Justificación económica

Desde el punto de vista económico, los destiladores solares representan una alternativa de bajo costo operativo, al utilizar la energía solar como fuente principal de energía, reduciendo la dependencia de

sistemas convencionales intensivos en consumo energético. La implementación de esta tecnología permitiría disminuir los costos asociados al tratamiento y disposición final de la salmuera residual, así como los gastos derivados del uso de agua potable en procesos productivos. Además, la recuperación de agua puede contribuir a fortalecer la resiliencia frente a crisis hídricas, mejorar la competitividad del sector agroindustrial y facilitar el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes, generando beneficios económicos sostenibles a mediano y largo plazo.

1.4.3 Justificación ambiental

Desde el punto de vista ambiental, el uso de destiladores solares permitiría la recuperación y purificación de agua a partir de fuentes no potables en zonas con acceso limitado a agua limpia, contribuyendo a la reducción de la escasez hídrica y a la satisfacción de las necesidades de las comunidades, sin generar presión adicional sobre los recursos hídricos convencionales.

1.5 Alcances y limitaciones

La metodología empleada en la presente investigación permitió evaluar la recuperación de agua a partir de la salmuera residual generada en el procesamiento de aceituna verde; sin embargo, su aplicación podría

extenderse a otros tipos de aceituna y a residuos líquidos de características similares, siempre que se realicen los ajustes técnicos correspondientes.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la dependencia del sistema respecto a las condiciones climáticas, particularmente la presencia de nubosidad en determinados días del año, lo cual influyó en la intensidad de la radiación solar incidente y, en consecuencia, en el rendimiento máximo del destilador solar.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Evaluar la recuperación de agua de la salmuera residual de aceituna verde mediante un destilador solar con acumulador de calor en la ciudad de Tacna

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia del destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde.
- Determinar el factor de productividad del destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor.
- Analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas de las muestras de agua residual del procesamiento de aceituna verde antes y después de la recuperación.

2.2 Hipótesis

2.2.1 Hipótesis general

El destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor permite recuperar agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde en la ciudad de Tacna.

2.2.2 Hipótesis específicas

- El destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor presenta una eficiencia adecuada en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde.
- El factor de productividad del destilador solar tipo cubeta varía en función del uso del acumulador de calor empleado durante el proceso de recuperación de agua.
- El proceso de destilación solar con acumulador de calor permite mejorar las características fisicoquímicas y microbiológicas de la salmuera residual de aceituna verde, obteniéndose agua que cumple con la normativa vigente para consumo humano.

2.3 Variables

2.3.1 Diagrama de variables

En la Figura 1 se observa el diagrama de variables de la presente investigación.

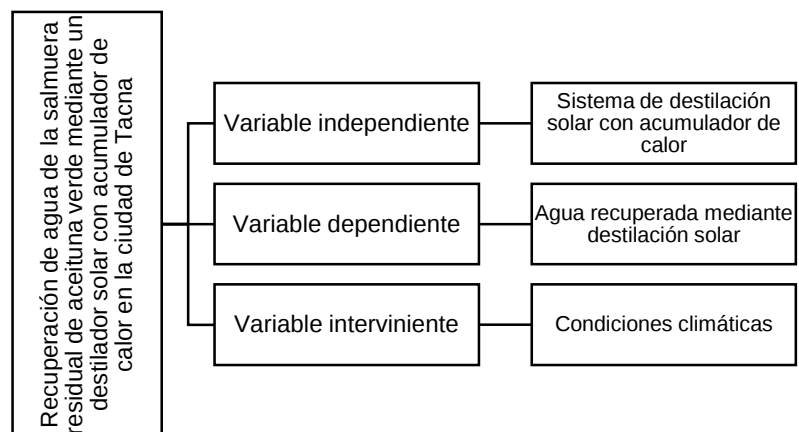


Figura 1

Diagrama de variables de estudio

a) Variable independiente

Sistema de destilación solar con acumulador de calor

b) Variable dependiente

Agua recuperada mediante destilación solar

c) Variable interviniente

Condiciones climáticas

2.3.2 Operacionalización de variables

En la Tabla 1 se mencionan las variables, dimensiones e indicadores que se emplearon para el presente trabajo de investigación.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Dimensión	Indicadores
Independiente		
X ₁ = Sistema de destilación solar con acumulador de calor	Almacenamiento térmico	- Tipo de acumulador de calor (GR: grava; GV: grava volcánica)
	Parámetros de operación	- Profundidad de la salmuera residual (cm) (P1: 1 cm; P3: 3 cm)
Dependiente		
Y ₁ = Agua recuperada mediante destilación solar	Producción de agua	- Volumen (L) - Factor de productividad (L/m ² día)
	Eficiencia del proceso	- Eficiencia (%) - Temperatura máxima (°C)
	Calidad fisicoquímica del agua recuperada	- pH - Conductividad eléctrica (µS/cm) - Turbidez (UNT) - Sólidos disueltos totales (mg/L) - Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L) - Demanda química de oxígeno (mg/L) - Eficiencia de remoción (%)
	Calidad microbiológica del agua recuperada	- Coliformes fecales (NMP/100 ml) - Coliformes totales (NMP/100 ml) - Eficiencia de remoción (%)
Interviniente		
Z ₁ = Condiciones climáticas	Parámetros meteorológicos incidentes	- Irradiancia solar (W/m ²) - Temperatura ambiente (°C)

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

3.1 Conceptos generales y definiciones

3.1.1 Destilador solar

Es un dispositivo que utiliza la radiación solar para evaporar agua a partir de fuentes no potables y posteriormente condensarla, permitiendo la obtención de agua purificada mediante un proceso físico de cambio de fase, sin el uso de energía convencional (Al-Mezeini et al., 2023).

3.1.2 Destilación solar

Proceso térmico que aprovecha la energía solar para separar el agua de los contaminantes disueltos o suspendidos, mediante evaporación y condensación, siendo una tecnología para la desalinización y el tratamiento de aguas residuales (Kabeel & El-Agouz, 2011).

3.1.3 Salmuera residual de aceituna verde

Residuo líquido generado durante el proceso de maceración y conservación de aceitunas verdes, caracterizado por altas concentraciones de sales, compuestos fenólicos y materia orgánica, con potencial impacto ambiental si no es tratado adecuadamente (Miranda, 2018).

3.1.4 Acumulador de calor

Elemento incorporado en sistemas térmicos que permite almacenar energía calorífica durante periodos de alta radiación solar y liberarla progresivamente, mejorando la estabilidad térmica y la eficiencia del proceso de destilación (Karthick et al., 2022).

3.1.5 Eficiencia térmica

Indicador que expresa la capacidad de un sistema de destilación solar para convertir la energía solar incidente en energía térmica útil destinada al proceso de evaporación del agua (Santos et al., 2017).

3.1.6 Factor de productividad

Parámetro que relaciona el volumen de agua destilada obtenida con el área efectiva del destilador y el tiempo de operación, permitiendo comparar el desempeño productivo de distintos sistemas de destilación (Polo & Pérez, 2020).

3.1.7 Comportamiento térmico

Respuesta térmica del destilador solar frente a las condiciones de operación y climáticas, evaluada mediante la variación de temperaturas internas, del agua y de los componentes del sistema (Al-Hayeka & Badran, 2004).

3.1.8 Calidad del agua

Conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que determinan la aptitud del agua para un uso específico, incluyendo parámetros como pH, conductividad eléctrica, turbidez, presencia de microorganismos, entre otros (OMS, 2022).

3.1.9 Condiciones climáticas

Se entienden como el conjunto de variables atmosféricas que caracterizan el estado del clima en una región determinada durante un periodo específico, incluyendo parámetros como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la nubosidad. Estas variables influyen en los procesos naturales y en las actividades humanas, y se analizan mediante registros meteorológicos sistemáticos (World Meteorological Organization, 2021).

3.1.10 Radiación solar

Es la energía electromagnética emitida por el Sol que se propaga a través del espacio y alcanza la superficie terrestre en forma de radiación directa, difusa y reflejada, influyendo en los procesos físicos, climáticos y energéticos del planeta. Su intensidad se expresa comúnmente en watts por metro cuadrado (W/m^2) (Duffie et al., 2020).

3.1.11 Temperatura ambiente

Es la medida del nivel térmico del aire que rodea un entorno determinado y que resulta de la interacción entre la radiación solar, las condiciones atmosféricas y las características geográficas del lugar. Se expresa generalmente en grados Celsius (°C) (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023).

3.2 Enfoques teóricos – técnicos

3.2.1 Destilación solar

La destilación solar es una tecnología de purificación de agua de fácil operación que utiliza la energía radiante del sol para separar el agua pura de sus contaminantes (Al-Hayeka & Badran, 2004; Kabeel & El-Agouz, 2011). Este proceso se fundamenta en la simulación del ciclo hidrológico natural, replicando a pequeña escala los fenómenos de evaporación y condensación (Krishna et al., 2017).

a) Principios de funcionamiento y procesos físicos

El mecanismo básico consiste en calentar un fluido (como agua salina o residual) dentro de un sistema hermético hasta alcanzar el punto de evaporación. Durante este cambio de fase, las moléculas de agua ascienden en forma de vapor, dejando atrás impurezas no volátiles como

sales, metales pesados y microorganismos patógenos (Al-Hayeka & Badran, 2004; Perca, 2023; Sanga, 2023).

Posteriormente, el vapor entra en contacto con una cubierta transparente (generalmente vidrio) que se encuentra a una temperatura menor. Al producirse este gradiente térmico, el vapor se condensa en gotas de agua purificada que, por efecto de la gravedad y la inclinación de la cubierta, se deslizan hacia canales de recolección para su almacenamiento final (Bellila et al., 2024; Santos et al., 2017).

b) Clasificación de los sistemas de destilación solar

Los destiladores solares se dividen en dos categorías principales según su configuración y el uso de fuentes de energía externas. De acuerdo a Bhattacharyya (2013); Manchanda & Kumar (2015) son:

- Destilación solar pasiva: Son sistemas sencillos y económicos que dependen exclusivamente de la radiación solar directa para evaporar el agua. Su construcción es simple, de bajo costo y requiere un mantenimiento mínimo.
- Destilación solar activa: Estos sistemas incorporan dispositivos externos como colectores térmicos, bombas de circulación o sistemas de seguimiento solar para aumentar la temperatura del agua. Aunque son más complejos, alcanzan una mayor eficiencia de producción.

c) Destilador solar de una vertiente

Es el diseño más sencillo y común debido a su facilidad de fabricación. El modelo de destilación solar de una sola vertiente consiste en una caja con una tapa de vidrio inclinada. Esta caja está dividida en dos secciones: una tiene un fondo negro donde se coloca el agua que se evaporará, y la otra es el recipiente que recoge el vapor condensado (Al-Mezeini et al., 2023; Kabeel & El-Agouz, 2011; Perca, 2025). En la Figura 2 se muestran las partes que la componen.

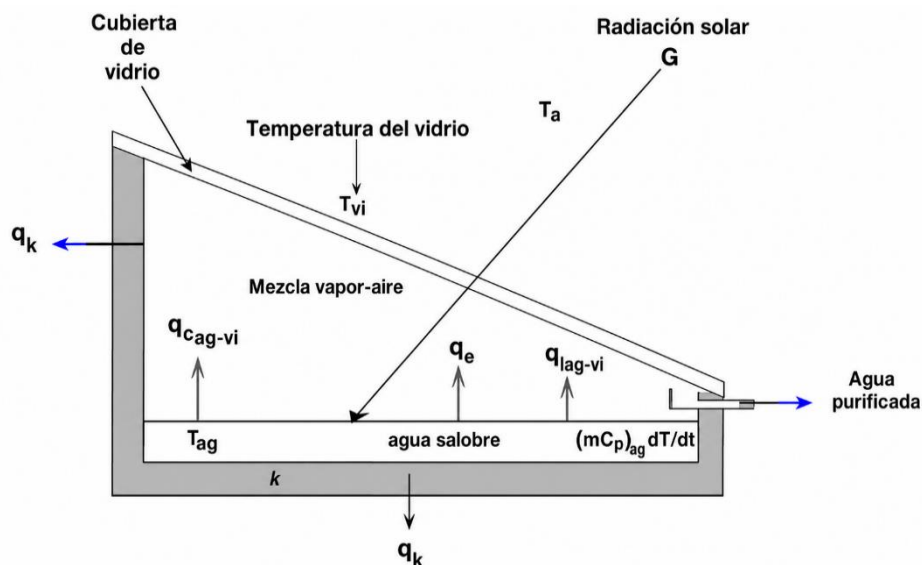


Figura 2

Sistema de destilación solar de una vertiente y sus partes

Nota. Obtenido de Córdova et al. (2023); Polo & Pérez (2020).

3.2.2 Eficiencia de un destilador solar

La eficiencia de un destilador solar se refiere a la capacidad del sistema para convertir la energía solar en energía térmica útil para el proceso de destilación. Esta eficiencia está influenciada por diversos factores, como la radiación solar, el diseño del destilador, las propiedades del material utilizado y la temperatura de funcionamiento (Bellila et al., 2024). La eficiencia de un destilador solar se obtiene a partir de la siguiente ecuación propuesta por (Kabeel et al., 2019):

$$n_d = \frac{m_p h_{fg}}{3\,600\,H} \quad (1)$$

Donde m_p es la cantidad de condensado obtenido en un día expresado en kg/m², h_{fg} es el calor latente de vaporización a la temperatura del agua salada contenida en la bandeja (T_{ag}) y H es la irradiación solar acumulada en un día en KWh/m².

3.2.3 Factor de productividad de un destilador solar

El factor de productividad en un sistema de destilación solar se define como la cantidad de agua purificada u obtenida por cada metro cuadrado (m²) de superficie colectora en un intervalo de tiempo específico, generalmente un día. Este parámetro permite comparar diferentes diseños

y configuraciones bajo diversas condiciones climáticas, siendo representado mediante la ecuación 2 (Arunkumar et al., 2019; Dueñas, 2021; Perca, 2025).

$$Q = \frac{V}{A \cdot T} \quad (2)$$

Donde Q es el factor de productividad (L/m²·día), V es el volumen total de agua destilada obtenida (L), A el área del destilador solar (m²) y T el tiempo de operación (días, horas). Es expresada comúnmente en litros o mililitros por metro cuadrado por día (L/m²·día o ml/m²·día)

3.2.4 Parámetros de funcionamiento de un destilador solar

Los parámetros de funcionamiento de un destilador solar comprenden el conjunto de variables de diseño, operación y condiciones ambientales que influyen directamente en los procesos de transferencia de calor y masa que ocurren durante la destilación solar. Estos parámetros determinan el comportamiento térmico del sistema, la tasa de evaporación–condensación y, en consecuencia, la eficiencia y productividad del destilador solar (Abujazar et al., 2016; Kalidasa & Srihar, 2011). Los parámetros se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros que influyen en destiladores solares

Tipo	Parámetro	Descripción
Parámetros de diseño	Configuración geométrica	La configuración estructural del destilador influye directamente en su eficiencia térmica y productiva. El diseño de una sola vertiente destaca por su simplicidad constructiva y bajo costo, mientras que configuraciones como dos vertientes, piramidal o escalonada presentan variaciones en el rendimiento según la aplicación.
	Área de evaporación (tina)	La producción de agua destilada es proporcional al área del fluido expuesta a la radiación solar.
	Profundidad del fluido	Una menor profundidad del agua reduce la inercia térmica, alcanzando temperaturas de evaporación más altas en menor tiempo e incremento en la producción del sistema.
	Material y espesor de la cubierta	El vidrio es el material más utilizado debido a su alta transmisividad solar. Espesores delgados, como 3 mm, favorecen la transferencia de calor y mejoran la condensación del vapor.
	Ángulo inclinación	Una inclinación adecuada de la cubierta optimiza la captación solar y facilita el escurrimiento del condensado hacia los canales de recolección.
	Aislamiento térmico	El uso de materiales aislantes en la base y laterales reduce las pérdidas de calor por conducción.
	Uso de reflectores	La incorporación de superficies reflectoras internas permite redirigir la radiación solar hacia la cubeta.
Parámetros de operación	Volumen alimentación	de El volumen de fluido cargado en la cubeta influye en el tiempo de calentamiento y en la tasa de producción.
	Orientación sistema	del Para maximizar la captación solar, el destilador debe orientarse hacia el ecuador; en el hemisferio sur, la orientación adecuada es norte-sur.
	Limpieza y mantenimiento	y La limpieza de la cubierta de vidrio y la cubeta evitan pérdidas de transmitancia.
Parámetros ambientales	Radiación solar	Es el factor externo más determinante; una mayor irradiancia incrementa la energía disponible para el proceso de evaporación.
	Temperatura ambiente	Temperaturas ambientales elevadas reducen las pérdidas térmicas hacia el entorno, favoreciendo la evaporación del agua.
	Nubosidad	La presencia de nubes reduce la radiación solar directa, disminuyendo la producción diaria de agua destilada.

Nota. Recopilado de Abujazar et al. (2016); Bansal et al. (2019); Barco & Pereda (2021); Córdova et al. (2023); Grewal et al. (2018); Kabeel et al. (2017); Kalidasa & Srithar (2011); Panchal & Patel (2016); Perca (2023); Sanga (2023).

3.2.5 Acumuladores de calor

Debido a que la energía solar es intermitente por naturaleza y no está disponible durante la noche, el almacenamiento de energía térmica resulta indispensable para ahorrar el exceso de energía captada durante las horas pico y compensar su escasez en periodos de baja irradiancia (Panchal, 2016). En un destilador solar, los acumuladores minimizan las caídas de temperatura y mantener el proceso de evaporación activo durante la noche, mejorando la productividad acumulada (Duffie et al., 2020; Grewal et al., 2018). En la Tabla 3 se presentan los materiales empleados para la acumulación de calor en sistemas de destilación solar.

Tabla 3

Materiales utilizados para la acumulación de calor en destiladores solares

Tipo	Material	Principio de funcionamiento y efecto
Calor sensible (Materiales pétreos)	Grava negra	Almacena energía térmica mediante el aumento de su temperatura sin cambio de fase. Su color oscuro favorece una alta absorción de radiación solar. Baja capacidad calorífica respecto al agua; alta absorptividad solar. Incrementa la productividad entre 10 y 19 %; eleva la temperatura de la salmuera hasta 64,4 °C y prolonga la evaporación.
	Grava volcánica	Material pétreo poroso con alta inercia térmica, capaz de retener calor por periodos prolongados. Permite prolongar la destilación durante la noche, llegando a aportar hasta el 60 % de la producción diaria total.
	Piedras naturales y mármol	Capacidad de almacenamiento térmico moderada; cuarcita ($\frac{3}{4}$ ") presenta buena estabilidad térmica. Permite una producción más uniforme durante las 24 horas; los materiales oscuros presentan mayor eficiencia de absorción.
Calor latente (PCM)	Parafina	Punto de fusión cercano a 56 °C; alta densidad de almacenamiento térmico. Mantiene activo el proceso de destilación durante varias horas nocturnas, mejorando la productividad total.
	Nano-PCM (parafina + nanopartícula)	Mejora la conductividad térmica del PCM mediante la adición de nanopartículas. Incrementa la eficiencia de producción respecto a sistemas con PCM convencionales.
Materiales metálicos y otros sólidos	Bolas de acero inoxidable	Alta conductividad térmica que favorece la transferencia de calor hacia el fluido. Mejora la tasa de evaporación y la eficiencia térmica del sistema.
	Aluminio y hierro (aletas, virutas)	Alta conductividad térmica; incremento del área de transferencia de calor. Reduce el tiempo de precalentamiento y aumenta la producción de destilado hasta en un 30 %.
	Carbón vegetal	Alta absorptividad solar; buena capacidad de almacenamiento térmico. Mejora el rendimiento del destilador en aproximadamente un 15 % frente a sistemas convencionales.

Nota. Recopilado de Abdallah et al. (2009); Bellila et al. (2024); Grewal et al. (2018); Jathar et al. (2022); Kabeel et al. (2019); Karthick et al. (2022); Krishna et al. (2017); Kumar & Shukla (2015); Kumar et al. (2022); Panchal (2016); Panchal

& Patel (2016); Perca (2025); Polo & Pérez (2020); Shah et al. (2023); Tiwari & Tiwari (2016); Zine et al. (2023).

3.2.6 Aguas residuales de salmuera de aceituna

Los efluentes líquidos del procesamiento de la aceituna representan uno de los residuos industriales más complejos debido a su elevada carga orgánica, salinidad y presencia de compuestos fitotóxicos (Miranda, 2018; Sanga, 2023).

a) Tipos de efluentes generados

Los residuos líquidos varían según el tipo de elaboración (verde, negra o aceite). De acuerdo con Del Pino (2016); Miranda (2018); Sanga (2023) segregándose principalmente en:

- Lejías de cocido: Son soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) utilizadas para hidrolizar la oleuropeína y eliminar el amargor del fruto.
- Aguas de lavado: Se emplean para retirar los restos de soda adheridos y penetrados en el fruto tras el cocido.
- Salmueras de fermentación: Líquidos con alto contenido de cloruro sódico (sal) y ácidos orgánicos donde ocurre la fermentación láctica.
- Aguas de otros procesos: Incluyen vertidos por el deshueso, relleno y el envasado final.

- Alpechín: Efluente específico de la extracción de aceite de oliva, compuesto por el agua de vegetación del fruto y el agua añadida en el proceso.

b) Características fisicoquímicas y microbiológicas

Estos efluentes se caracterizan por ser materia orgánica poco biodegradable con un alto porcentaje de grasas y sólidos (Miranda, 2018). Según los investigadores Del Pino (2016); Miranda (2018); Pastor et al. (2014); Sanga (2023) el efluente puede presentar las siguientes características:

- Fisicoquímicas: Presentan una Demanda Química de Oxígeno (DQO) extremadamente alta (entre 13 800 y 22 000 mg/L) y una Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) de 9 500 a 35 000 mg/L. Tienen una conductividad muy elevada (77 - 99 mS/cm) debido a la salinidad, y coloraciones oscuras producidas por los polifenoles (800 - 1 300 mg/L), que son difíciles de degradar. El pH varía desde fuertemente alcalino en las lejías (pH > 12) hasta fuertemente ácido en las salmueras de fermentación (pH 3,9 – 4,1).
- Microbiológicas: Se han identificado bacterias Gram-negativas como: *Enterobacter cloacae*, *Citrobacter freundii* y *Escherichia coli* durante las fases iniciales de fermentación.

c) Impacto ambiental

El vertimiento incontrolado de estos efluentes, especialmente en suelos agrícolas como los de La Yarada Los Palos, genera daños severos (Miranda, 2018; Sanga, 2023):

- **Degradación del suelo:** La acumulación de sodio y sales provoca la pérdida de productividad, infertilidad y acelera la desertificación.
- **Toxicidad:** Los compuestos fenólicos tienen un carácter fitotóxico, lo que impide el crecimiento normal de las plantas y afecta a la microflora del suelo.
- **Contaminación de acuíferos:** Existe un alto riesgo de infiltración hacia las aguas subterráneas y la napa freática, alterando el equilibrio del ecosistema local.

d) Tratamientos

Dada la dificultad de su depuración por métodos convencionales, se han propuesto diversas estrategias:

- **Control interno y reúso:** Reutilizar las lejías de cocido permite recuperar un 40% del NaOH y reducir el consumo de agua (Del Pino, 2016; Miranda, 2018).

- Destilación solar: Se presenta como una tecnología limpia y viable que utiliza la energía del sol para separar el agua pura de los contaminantes no volátiles, logrando remociones elevadas de salinidad y carga bacteriana (Sanga, 2023).
- Sistemas de filtración por membranas: Incluyen tecnologías como la ósmosis inversa y la electro-ultrafiltración, las cuales son adecuadas para determinados efluentes del procesamiento de aceituna. Estos sistemas permiten la reutilización del agua dentro del proceso productivo y contribuyen a la reducción del consumo de reactivos. En algunos casos, es necesario realizar modificaciones en las etapas de elaboración para facilitar el tratamiento de los residuos sin afectar la calidad del producto final (López, 2007; Miranda, 2018).
- Adsorción con carbón activo: Es un método eficaz para eliminar polifenoles (responsables del color y toxicidad) y reducir la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Miranda, 2018).
- Digestión anaerobia: Ha sido evaluada principalmente a escala de laboratorio y piloto. Su aplicación es limitada debido a la presencia de polifenoles en los efluentes del procesamiento de aceituna, ya que solo resulta eficiente cuando la carga orgánica es baja, generalmente inferior a 1 g/L (López, 2007).

- Procesos de evaporación e incineración: Presentan una aplicabilidad más general para distintos tipos de efluentes. No obstante, requieren una elevada inversión inicial para la instalación de las plantas. Los costos operativos, especialmente los energéticos, pueden reducirse mediante el aprovechamiento de subproductos del proceso, como huesos de aceituna o concentrados de evaporación. Sin embargo, los condensados obtenidos suelen conservar una carga orgánica significativa (ácidos volátiles y alcoholes), por lo que es necesario aplicar tratamientos adicionales, usualmente de tipo biológico (López, 2007).

3.2.7 Reglamento y estándar de calidad del agua

La calidad del agua se define como el conjunto de características físicas, químicas, biológicas y organolépticas que determinan su aptitud para un uso específico (Villena, 2018). Según la Organización Mundial de la Salud, el agua se considera inocua si no representa un riesgo significativo para la salud durante toda una vida de consumo, incluyendo las diferentes sensibilidades en las etapas de vida (OMS, 2022).

a) Reglamento de la calidad del agua para consumo humano

Está establecido por el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA, aprobado por el Ministerio de Salud a través de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA). Esta norma tiene por objeto garantizar la

inocuidad del agua destinada al consumo humano, estableciendo requisitos físico-químicos, microbiológicos y de tratamiento para el agua potable con el fin de prevenir riesgos sanitarios y proteger la salud pública. La Tabla 4 muestra límites máximos permisibles para garantizar la inocuidad y calidad del agua para consumo humano.

Tabla 4

Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica y microbiológica de calidad del agua para consumo humano

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Calidad organoléptica		
Turbiedad	UNT	5
pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
Conductividad (25 °C)	µmho/cm	1 500
Sólidos totales disueltos	mgL ⁻¹	1 000
Microbiológicos		
Bacterias Coliformes Totales	UFC/100 ml a 35 °C	0 (*)
Bacterias Coliformes Termotolerantes o Fecales.	UFC/100 ml a 44,5 °C	0 (*)

Nota. Se presentan los parámetros comparados en la presente investigación. Obtenido del Decreto Supremo N.º 031-2010-SA. Reglamento de la calidad del agua para consumo humano.

b) Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua

Son instrumentos de gestión ambiental adoptados en el Perú para medir y controlar la calidad de los cuerpos de agua, protegiendo tanto la salud humana como los ecosistemas. Los ECA fijan valores máximos

permitidos de contaminantes físicos, químicos y biológicos que no deben ser excedidos para evitar efectos adversos. El Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM consolida y actualiza los ECA para agua, compila y modifica parámetros establecidos en normas anteriores y establece categorías y límites aplicables a diferentes cuerpos receptores. En la Tabla 5 se presenta el ECA para aguas, categoría 1 (Poblacional y Recreacional) - subcategoría A (Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable) y categoría 3 (Riego de vegetales y bebida de animales).

Tabla 5

ECA para aguas, categoría 1 - subcategoría A y categoría 3

Parámetros	Unidad	Categoría 1 - A			Categoría 3	
		A1	A2	A3	D1	D2
Físicos - químicos						
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5	5,5 – 9,0	5,5 - 9,0	6,5 – 8,5	6,5 – 8,4
Conductividad	(µS/cm)	1 500	1 600	-	2 500	5 000
Turbiedad	UNT	5	100	-	-	-
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1 000	1 000	1 500	-	-
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	10	20	30	40	40
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	3	5	10	15	15
Microbiológicos y parasitológicos						
Coliformes Totales	NMP/100 ml	50	-	-	-	-
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	20	2 000	20 000	1 000	1 000

Nota. A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección, A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional, A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado, D1: Riego de vegetales, D2: Bebida de animales. Se registra en la tabla los parámetros comparados en la presente

investigación. Obtenido del Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias.

3.3 Marco referencial

3.3.1 Nivel internacional

En el estudio experimental de Mevada et al. (2022) denominado *“Investigación y análisis del rendimiento de un destilador solar con materiales de almacenamiento de energía: un análisis de eficiencia energética-exergética”*, se evaluó el desempeño de un destilador solar convencional y uno modificado con materiales de almacenamiento de energía térmica, empleando esferas de vidrio negro, granito negro y mármol blanco. Los resultados evidenciaron que el destilador con almacenamiento térmico alcanzó una producción diaria de 2,5 kg/m², superior al destilador convencional (1,4 kg/m²). Asimismo, la eficiencia exergética se incrementó de 4,99 % a 12,55 %, demostrando que los materiales sólidos de alta inercia térmica mejoran la evaporación diurna y mantienen la producción durante periodos de baja irradiancia.

En la investigación experimental de Escandón & Fernández (2021) titulada *“Diseño de un prototipo de destilador solar para la obtención de agua apta para consumo humano en una familia”*, construyeron un

destilador solar de una vertiente con dimensiones de 143 cm de altura, 0,60 m de ancho y 0,60 m de largo. El sistema incorporó una cubierta de vidrio de 3 mm de espesor, con un ángulo de inclinación de 45°, y una vida útil estimada de diez años. Los resultados indicaron que, a un nivel de agua de 0,26 m, se alcanzó una producción de 1,5 L/día. En cuanto a la calidad del agua recuperada, se registraron valores promedio de turbidez de 2,75 NTU, pH de 8,27 y conductividad eléctrica de 123,35 $\mu\text{S}/\text{cm}$, concluyendo que el agua destilada cumplió con los criterios de aptitud para consumo humano.

Al-Mezeini et al. (2023) en su investigación titulada *“Diseño y estudios experimentales de un destilador solar de una sola pendiente para desalinización de agua”*, evaluaron el desempeño de un destilador solar de una vertiente bajo diferentes profundidades de agua. Los resultados demostraron que una profundidad de 4 cm presentó la mayor productividad de agua, alcanzando 2,680 L/día y una eficiencia del 30 %, en comparación con profundidades de 5, 6 y 7 cm. Asimismo, al incorporar un espejo externo al sistema, se incrementó la temperatura del depósito, lo que permitió elevar la productividad hasta 3,075 L/día y mejorar la eficiencia térmica al 35 %. El estudio también analizó la influencia de variables climáticas como la radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente sobre la productividad diaria del destilador.

En la investigación de Santos et al. (2017) denominada *“Evaluación experimental de un destilador solar de una sola pendiente”*, determinaron que la eficiencia térmica máxima alcanzada por el sistema fue de 46,9 %, utilizando condensadores con espesores de 5 mm y 2 mm. Asimismo, se evidenció una relación directa y proporcional entre la radiación solar incidente y el volumen de agua destilada, confirmando la importancia de la energía solar como factor determinante en el rendimiento del destilador.

Karthick et al. (2022) en su estudio titulado *“Mejora de la productividad de un alambique solar de pendiente única con medio de almacenamiento de energía”*, evaluaron un destilador solar con un peso de 6,1 kg, dimensiones de 80 cm de largo, 40 cm de ancho y 18 cm de alto, y un área efectiva de 0,32 m². Los resultados mostraron que el sistema alcanzó una temperatura interna máxima de 83 °C y una producción de agua destilada de 355 ml, equivalente a 0,369 L/m²·h. El agua obtenida presentó un pH de 6,91 y una conductividad eléctrica de 95 µS/cm, evidenciando una mejora en la calidad del agua y en la productividad del destilador mediante el uso de almacenamiento térmico.

Panchal (2016) en el artículo de revisión *“Uso de materiales de almacenamiento de energía térmica para mejorar la producción de destilado de alambiques solares”*, analizó diversas investigaciones que incorporaron materiales de almacenamiento térmico, destacando el uso de

rocas volcánicas y granito negro por su elevada capacidad de absorción y liberación de calor. La revisión señala que las rocas volcánicas permitieron incrementos de productividad de hasta 60 %, al mantener temperaturas más estables en la cubeta durante horas de baja o nula irradiancia solar. El autor concluye que estos materiales superan a otros medios de almacenamiento, como placas metálicas o parafina, y resultan especialmente adecuados para mejorar la eficiencia y el rendimiento nocturno del destilador solar.

3.3.2 Nivel nacional

En la investigación de Bedoya & Chaparro (2018) denominada “*Uso de un destilador solar tipo caja para la obtención de agua destilada del mar de Ilo, 2018*”, desarrollaron un estudio experimental con un tratamiento y tres repeticiones, orientado a evaluar el desempeño de un destilador solar tipo caja con dos reflectores. El sistema presentó un área de captación de 0,32 m², una altura de 18 cm, un ancho de 40 cm, un largo de 80 cm y un peso de 6,1 kg. Los resultados evidenciaron que, en condiciones de radiación solar elevada, la temperatura máxima del aire interno alcanzó los 83 °C durante el periodo comprendido entre las 10:00 y las 15:00 h, logrando una producción de 355 ml de agua destilada a partir de agua de mar.

Polo & Pérez (2020) en su investigación titulada *“Construcción y caracterización de un destilador solar de una vertiente con superficie reflectora”*, tuvieron como objetivo construir y evaluar el desempeño de un destilador solar de una vertiente. El equipo presentó dimensiones de 80 cm de altura en la parte posterior y 35 cm en la parte frontal, con una capacidad volumétrica de 0,58 m³. Durante la evaluación experimental, utilizando 25 L de agua salada, se obtuvo una producción de 2,19 L de agua destilada. Asimismo, la concentración de sal se redujo de 41,3 g/L a 0,004 g/L y el pH disminuyó de 7,87 a 7,03. El rendimiento de destilación fue mayor en las superficies laterales de vidrio, alcanzando 3,05 L/m²·día, en comparación con el cobertor superior, que registró 0,75 L/m²·día.

En el estudio de Dueñas (2021) denominado *“Rendimiento de un destilador solar mejorado para la desalinización de agua en el distrito de Jesús María (Lima-Perú)”*, evaluó el desempeño de un destilador solar mejorado. Los resultados demostraron que el sistema alcanzó una producción máxima de 825 ml de agua desalada, equivalente a 2 291,7 ml/m²·día, con una eficiencia térmica del 29,4 %. Además, se evidenció una reducción significativa de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada, registrándose disminuciones del 99,65 % en sólidos disueltos totales, 99,74 % en conductividad eléctrica y 96,11 % en turbidez, mientras que el pH se redujo de 7,8 a 6,6.

Córdova et al. (2023) en la investigación titulada “*Destilador solar de tipo una vertiente y la purificación de la calidad del agua, Ica*”, evaluaron la eficacia de un destilador solar de una vertiente para la purificación de agua de mar. Las variables analizadas incluyeron la salinidad, el pH, la turbidez y la presencia de bacterias. Los resultados indicaron que el agua destilada cumplió con los estándares de calidad establecidos por la normativa vigente, registrándose valores de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de 0,0 mg/L, oxígeno disuelto de 10 mg/L y ausencia de coliformes termotolerantes (0,0 NMP/100 ml a 44,5 °C), evidenciando la efectividad del sistema en la mejora de la calidad del agua.

3.3.3 Nivel regional

Rodríguez (2021) en la investigación titulada “*Comparación de tres destiladores solares para la obtención de agua destilada de mar en Tacna, 2019*”, diseñó y construyó tres destiladores solares tipo caja de una sola vertiente: un destilador con base aislada y dos reflectores (D1), un destilador con base aislada sin reflectores (D2) y un destilador sin aislamiento térmico (D3). Los resultados mostraron que, durante el periodo de operación comprendido entre las 8:00 y las 16:00 h, el destilador D1 presentó el mayor volumen promedio de agua destilada, alcanzando 1 340,60 ml, seguido del D2 con 416,30 ml y del D3 con 197,60 ml. El estudio concluyó que el uso de aislamiento térmico y reflectores incrementó

significativamente la producción de agua, obteniéndose agua destilada de adecuada calidad.

En la investigación de Sanga (2023) *“Recuperación de agua de los residuos líquidos del proceso de macerado de la aceituna con un destilador solar de una vertiente en la ciudad de Tacna”*, evaluó la eficiencia de un destilador solar de una vertiente aplicado al tratamiento de residuos líquidos de aceituna. Los resultados indicaron que el destilador alcanzó una eficiencia máxima del 11,16 % en un área de 0,68 m², con una destilación diaria máxima de 966 ml. Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos demostraron que los valores de conductividad, turbidez y coliformes termotolerantes cumplieron con la normativa vigente; no obstante, se registraron concentraciones elevadas de materia orgánica, DBO₅ y DQO, asociadas a la presencia de compuestos fenólicos propios del residuo tratado.

Perca (2023) en su investigación *“Evaluación comparativa de destiladores solares tipo cubeta en la eficiencia de producción/purificación de aguas grises en la ciudad de Tacna”*, reportó que el destilador de una vertiente con reflector interno alcanzó una temperatura interna máxima de 73 °C y una eficiencia térmica del 24,86 %. Asimismo, se obtuvo un volumen acumulado de agua destilada de 3,34 L/día, correspondiente a un factor de productividad de 5,66 L/m²·día y una eficiencia de producción del

67,65 %. Los resultados evidenciaron que la mayor producción se logró con una profundidad de agua de 1 cm, destacando la influencia del diseño del destilador en su desempeño.

En el estudio de Perca (2025) denominado *“Efecto de parámetros de diseño en el factor de producción de un destilador solar de una vertiente en la destilación de agua de mar en Tacna”*, evaluó el impacto del reflector interno, el uso de almacenador térmico y la profundidad del agua de mar sobre el desempeño del destilador solar, mediante un diseño factorial $2 \times 2 \times 2$. Los resultados mostraron que la configuración con reflector interno, almacenador térmico y una profundidad de 1 cm alcanzó la mayor temperatura del agua (70 °C), una eficiencia térmica del 22,47 % y una producción máxima de 3,09 L/día, equivalente a un factor de productividad de 5,25 L/m²·día. Asimismo, el agua destilada presentó una eficiencia de remoción del 99 %, cumpliendo con los estándares de calidad para agua de consumo humano y los Estándares de Calidad Ambiental para agua, categoría 1-A1.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo de investigación

La presente investigación fue de tipo experimental y de enfoque cuantitativo, debido a que se manipuló el sistema de destilación solar mediante tipo de acumulador de calor y la profundidad de la salmuera residual de aceituna verde, con el fin de evaluar su efecto sobre la recuperación de agua. Asimismo, el enfoque cuantitativo permitió medir y analizar variables mediante el uso de indicadores numéricos y procedimientos estadísticos.

4.2 Nivel de investigación

El nivel de la investigación fue aplicativo porque busca entender el comportamiento del destilador solar con acumuladores de calor en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde. Se realizó en campo y en laboratorio, controlando variables estudio.

4.3 Diseño de investigación

Se empleó un diseño factorial 2 x 2 con la finalidad de determinar el efecto de los acumuladores de calor y la profundidad del agua en el destilador solar, los factores son los siguientes: tipo de acumulador de calor

(Factor A) y la profundidad de agua (Factor B); estos factores permiten obtener 4 corridas con 4 repeticiones, haciendo un total de 16 unidades experimentales. Las variables de respuestas fueron: la temperatura máxima, la eficiencia y el factor de productividad. En la Tabla 6 se muestran los factores a considerar en la investigación.

Tabla 6

Factores y repeticiones de la investigación

		Factor B: Profundidad del agua	
		P1 (1 cm)	P3 (3 cm)
Factor A: Tipo de acumulador de calor	GR:	R ₁ R ₂	R ₁ R ₂
	Grava	R ₃ R ₄	R ₃ R ₄
	GV:	R ₁ R ₂	R ₁ R ₂
	Grava volcánica	R ₃ R ₄	R ₃ R ₄

Nota. R₁: primera repetición, R₂: segunda repetición, R₃: tercera repetición, R₄: cuarta repetición.

4.4 Población y muestra

4.4.1 Población

La población de estudio estuvo conformada por la salmuera residual de aceituna verde generada en la región de Tacna, específicamente de los productores de aceitunas de la zona del distrito de La Yarada Los Palos, provincia de Tacna, región de Tacna.

4.4.2 Muestra

La muestra de agua de salmuera residual de aceituna verde correspondió a un total de 400 L provenientes de la empresa de aceituna

Agroindustrias Santa María E.I.R.L. ubicada en el sector de Los Olivos del distrito de La Yarada Los Palos. La investigación se realizó a partir de un muestreo no probabilístico por conveniencia, eligiendo productores accesibles que cumplan con ciertos criterios, como la disponibilidad y calidad de la salmuera residual disponible.

4.5 Técnicas aplicadas en la recolección de la información

Para la recolección de la información se emplearon las siguientes técnicas: observación directa, medición instrumental, registro de datos y análisis de laboratorio. La observación directa se aplicó durante la operación del destilador solar, a fin de verificar su funcionamiento y registrar incidencias relevantes. La medición instrumental permitió registrar variables térmicas, climáticas y productivas, tales como la temperatura interna del destilador, la temperatura del agua, la irradiancia solar y el volumen de agua destilada. Asimismo, los datos obtenidos se registraron en fichas de campo y se contó con registro fotográfico y videográfico de las distintas etapas de la investigación, además de realizar análisis de laboratorio para evaluar los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua recuperada.

4.5.1 Desarrollo de la investigación

En la Figura 3 se muestran las principales etapas en el desarrollo del trabajo de investigación.

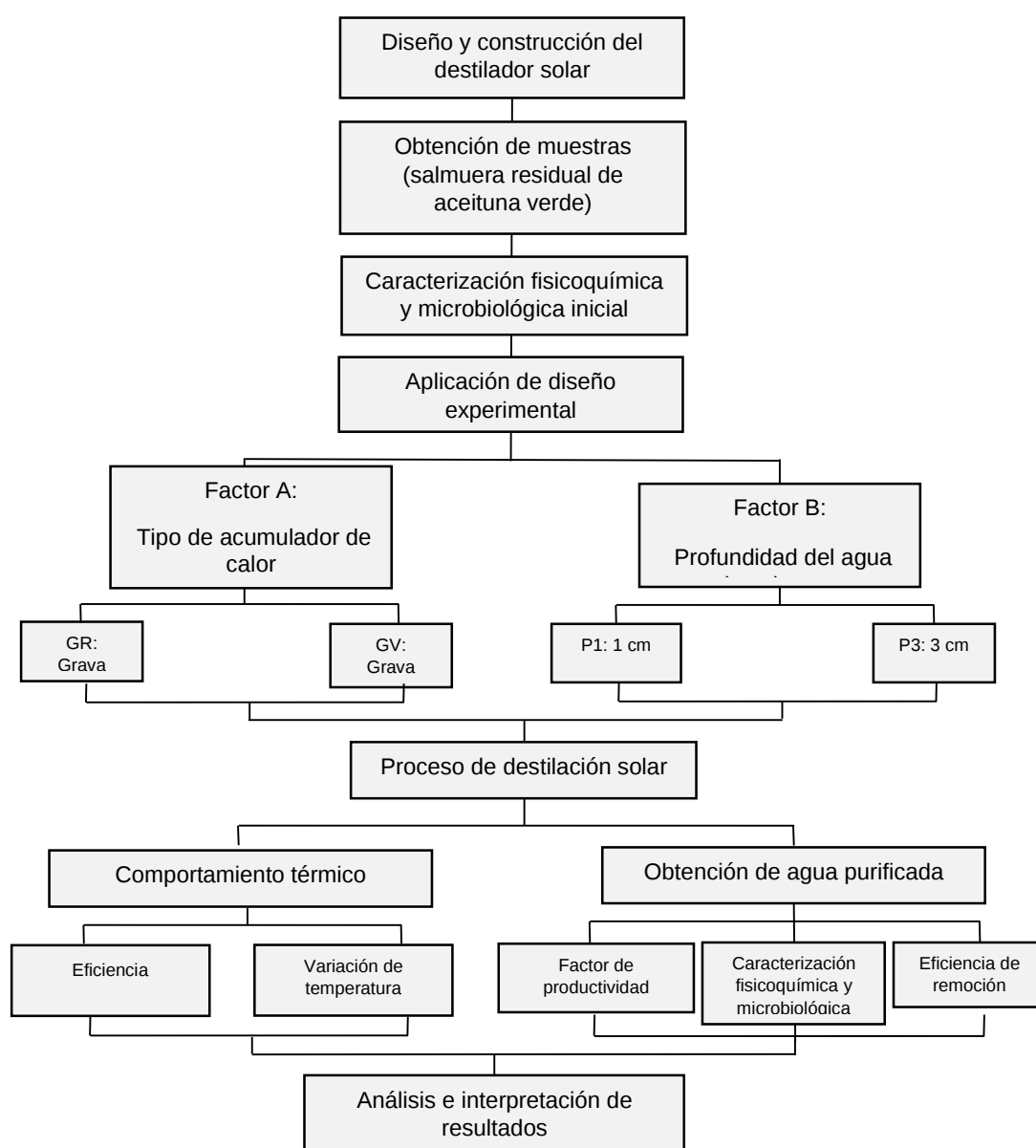


Figura 3

Diagrama de las etapas principales en el desarrollo del trabajo de investigación

a) Evaluación de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con acumulador

a.1) Construcción del destilador solar

Para la investigación se diseñó y construyó un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con acumulador de calor, considerando criterios de eficiencia térmica, resistencia de materiales y facilidad de operación, de acuerdo con recomendaciones de estudios sobre destilación solar (Al-Mezeini et al., 2023; Karthick et al., 2022; Perca, 2025).

Como se muestra en la Figura 4, el destilador solar presenta dimensiones externas de 1,05 m × 0,65 m, mientras que la cubeta interna tiene dimensiones útiles de 1,00 m × 0,60 m, lo que corresponde a un área interna de 0,60 m². La profundidad máxima de operación es de 0,10 m, otorgando una capacidad máxima de almacenamiento de 0,06 m³ (60 L) de salmuera residual de aceituna verde.

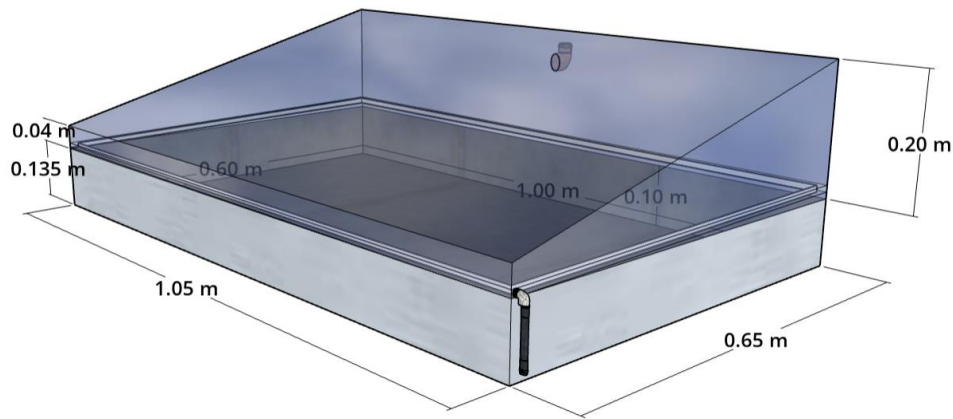


Figura 4

Dimensiones del destilador solar de una vertiente

En la Figura 5 se observa que la cubierta superior del destilador solar fue construida con vidrio semidoble, dispuesta en una sola vertiente. La cubeta de almacenamiento y la cubierta externa fueron fabricadas en acero inoxidable. La cubeta fue recubierta con pintura negra epóxica. Entre la cubeta y la cubierta externa se colocó aislante térmico de fibra de vidrio, con la finalidad de reducir pérdidas de calor. El área interna cuenta con canaletas de recolección que conducen el agua condensada hacia el punto de salida.

El destilador incorpora un sistema de ingreso de agua y puertos para termocuplas, elaborados con codos de material PVC, permitiendo el monitoreo continuo de la temperatura interna. La salida del agua destilada se realizó mediante un codo conectado a mangueras de riego de color negro, facilitando la recolección del agua recuperada. En cuanto al

acumulador de calor, se consideró el uso de 1,5 kg de grava y 1,5 kg de grava volcánica, material que se colocó en la cubeta de almacenamiento.

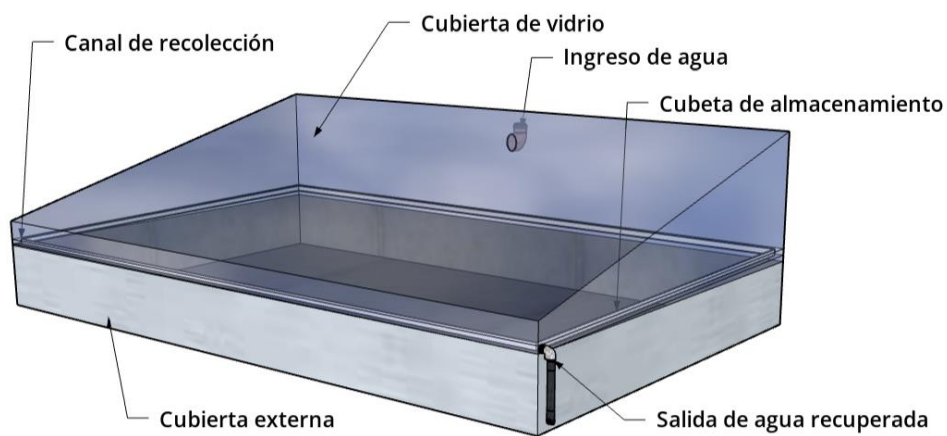


Figura 5

Componentes del destilador solar

a.2) Comportamiento térmico

a.2.1) Variación de temperatura

Para la evaluación del comportamiento térmico del destilador solar se emplearon termocuplas ubicadas en tres puntos de monitoreo dentro del sistema, con el fin de registrar la evolución de la temperatura durante el proceso de destilación. En la Figura 6 se muestran los puntos de medición establecidos, definidos de la siguiente manera:

- T_{AB} : Temperatura del agua almacenada en la base de la cubeta.
- T_{IV} : Temperatura de la superficie interior de la cubierta de vidrio.
- T_{EV} : Temperatura de la superficie exterior de la cubierta de vidrio.



Figura 6

Ubicación de los puntos de monitoreo

El registro de temperatura se realizó cada minuto durante un periodo continuo de 12 horas, comprendido entre las 07:00 y 19:00 h, utilizando un multímetro digital UNI-T UT55 y tres sistemas de adquisición de datos HOBO 4-channel thermocouple logger, marca Onset, modelo UX120-014M, equipos comúnmente empleados en estudios experimentales de destilación solar para el análisis del comportamiento térmico (Perca, 2023; Sanga, 2023).

De manera complementaria, se midieron las condiciones ambientales, registrándose la temperatura ambiente (T_{AMB}) mediante un sensor de temperatura y la irradiancia solar mediante un piranómetro,

ambos integrados a una estación meteorológica. Estos parámetros fueron registrados con una frecuencia de un minuto, permitiendo analizar la relación entre las condiciones climáticas y la variación térmica del destilador solar (Perca, 2023; Sanga, 2023; Santos et al., 2017).

a.2.2) Eficiencia

La eficiencia térmica del destilador solar se determinó con el propósito de evaluar la capacidad del sistema para convertir la energía solar incidente en energía útil destinada a la evaporación y posterior condensación del agua contenida en la cubeta. Para su cálculo se empleó la Ecuación 1, propuesta por Kabeel et al. (2019).

a.3) Volumen de agua producido

El volumen de agua producido corresponde a la cantidad recuperada mediante el proceso de destilación solar, la cual fue obtenida como condensado a la salida del sistema. La medición del agua destilada se realizó utilizando una probeta graduada. El registro del volumen de agua destilada se efectuó en un periodo continuo de 24 horas, iniciando a las 07:00 h y culminando a las 07:00 h del día siguiente (Al-Mezeini et al., 2023; Karthick et al., 2022; Perca, 2025).

b) Determinación del factor de productividad del destilador construido con acumulador de calor

El factor de productividad del destilador solar con acumulador de calor permitió determinar el rendimiento del sistema en función de la cantidad de agua destilada producida por unidad de área y por día, siendo calculado mediante la Ecuación 2 (Arunkumar et al., 2019; Dueñas, 2021; Perca, 2025).

El volumen de agua destilada considerado para el cálculo del factor de productividad fue el obtenido durante un periodo continuo de 24 horas. El área efectiva utilizada correspondió al área interna de la cubeta de almacenamiento.

c) Análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas de las muestras de agua residual del procesamiento de aceituna verde antes y después de la destilación

Se realizó el análisis fisicoquímico y microbiológico de las muestras de salmuera residual de aceituna verde, tanto antes como después del proceso de destilación solar. Las muestras recolectadas de la empresa Agroindustrias Santa María E.I.R.L. fueron conservadas y posteriormente transportadas para su análisis. Los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), coliformes

termotolerantes y coliformes fecales; se analizaron en el laboratorio acreditado ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L., ubicado en la región de Arequipa. Por otro lado, los parámetros: conductividad eléctrica, turbidez, pH, sólidos disueltos totales y salinidad; fueron analizados en el Laboratorio de Análisis de Aguas de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG) (Perca, 2023; Sanga, 2023). Los parámetros analizados y los métodos empleados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7*Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados*

Característica	Parámetro	Unidad	Método de análisis
Fisicoquímicos	Potencial de hidrógeno (pH)	—	Método del multiparámetro a lectura directa
	Conductividad eléctrica	μS/cm	Método del multiparámetro a lectura directa
	Salinidad	%	Método del multiparámetro a lectura directa
	Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L	Método del multiparámetro a lectura directa
	Turbidez	UNT	Método del turbidímetro a lectura directa
	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	Método Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5-Day BOD Test con norma referencia SMEWW-APHA-AWWA-WEF
	Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	Método Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method con norma referencia SMEWW-APHA-AWWA-WEF
Microbiológicos	Coliformes totales	NMP/100 ml	Método de fermentación en tubos múltiples – SMEWW-APHA-AWWA-WEF 9221 F
	Coliformes fecales	NMP/100 ml	Método de fermentación en tubos múltiples – SMEWW-APHA-AWWA-WEF 9221 F

Nota. Recopilado de Limache (2021); Perca (2023).

Complementariamente se determinó la eficiencia de remoción, a fin de determinar el porcentaje de mejora en la calidad del agua obtenida

mediante el proceso de destilación solar. Para ello, se empleó la ecuación propuesta por De La Cruz & Fuster (2021):

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{VPi - VPf}{VPi} * 100 \quad (3)$$

Donde: VPi es el valor inicial de la muestra y VPf es el valor final de la muestra después de la recuperación

4.6 Instrumentos de medición

4.6.1 Materiales y equipos

a) Materiales

- Láminas de acero inoxidable
- Plancha de vidrio
- Silicona transparente
- Pintura negra epóxica
- Aislante térmico (fibra de vidrio)
- Mangueras de riego color negro
- Canales para cable
- Botellas de vidrio transparente
- Probetas graduadas
- Cinta métrica
- 2 baldes de 5 L
- 400 L de salmuera de aceituna verde
- Termocuplas
- Acumuladores de calor: Grava y grava volcánica

b) Equipos

- Multiparámetro
- Turbidímetro
- Piranómetro
- Multímetro
- Laptop
- Sistema de adquisición de datos HOBO 4-channel thermocouple logger
- Estación meteorológica
- Cronómetro digital
- Prototipo de destilador solar tipo cubeta de una vertiente

4.7 Métodos estadísticos utilizados

El procesamiento de la información se realizó mediante Microsoft Excel, utilizado para la elaboración de tablas y gráficos del comportamiento térmico y la producción de agua destilada. La evaluación de la eficiencia térmica, el volumen de agua producido y el factor de productividad se efectuó mediante un análisis de varianza (ANOVA). Posteriormente, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey, considerando un nivel de significancia de 5 % ($p < 0,05$), a fin de identificar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. El análisis estadístico se realizó utilizando el programa InfoStat, versión libre 2020, permitiendo validar estadísticamente los resultados obtenidos y comprobar las hipótesis planteadas (Sanga, 2023).

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados

5.1.1 Evaluación de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con de acumulador calor

a) Comportamiento térmico del destilador solar

Para el análisis del comportamiento térmico se consideraron los siguientes puntos de monitoreo en el destilador solar: temperatura inferior de la cubierta de vidrio (T_{IV}), temperatura exterior de la cubierta de vidrio (T_{EV}), temperatura del agua almacenada en la base de la cubeta (T_{AB}). Asimismo, se midió la temperatura ambiente (T_{AMB}) e irradiancia solar incidente en plano horizontal.

La Figura 7 muestra el comportamiento térmico del destilador solar con grava y 1 cm de profundidad (6 L) de salmuera residual de aceituna verde durante el periodo comprendido entre las 7:00 y 19:00 h. Debido al reducido volumen de agua, el sistema presentó un incremento de temperatura en horas de la mañana, alcanzando su mayor desempeño térmico entre las 10:00 y 14:00 h, intervalo en el que la irradiancia solar registró un valor máximo de 921 W/m^2 y la T_{AMB} alcanzó 24°C .

En este periodo, la T_{AB} alcanzó un valor máximo de 70 °C, mientras que la T_{IV} y la T_{EV} registraron temperaturas de 57 °C y 55 °C, respectivamente, evidenciando una adecuada transferencia de calor desde el fluido hacia la cubierta de vidrio.

A partir de las 17:30 h, con la disminución progresiva de la irradiancia solar se evidencia un descenso de las temperaturas del sistema. El bajo volumen de agua favoreció una rápida pérdida de calor, lo que se refleja en que, hacia las 19:00 h, tanto la T_{IV} como la T_{EV} descienden hasta valores inferiores a la T_{AMB} , la cual fue de 15 °C. No obstante, la T_{AB} se mantiene aún entre 2 y 3 °C por encima de la T_{AMB} , lo que indica que la grava empleada almacenó parte de la energía térmica acumulada durante el periodo diurno, contribuyendo a prolongar el proceso de evaporación.

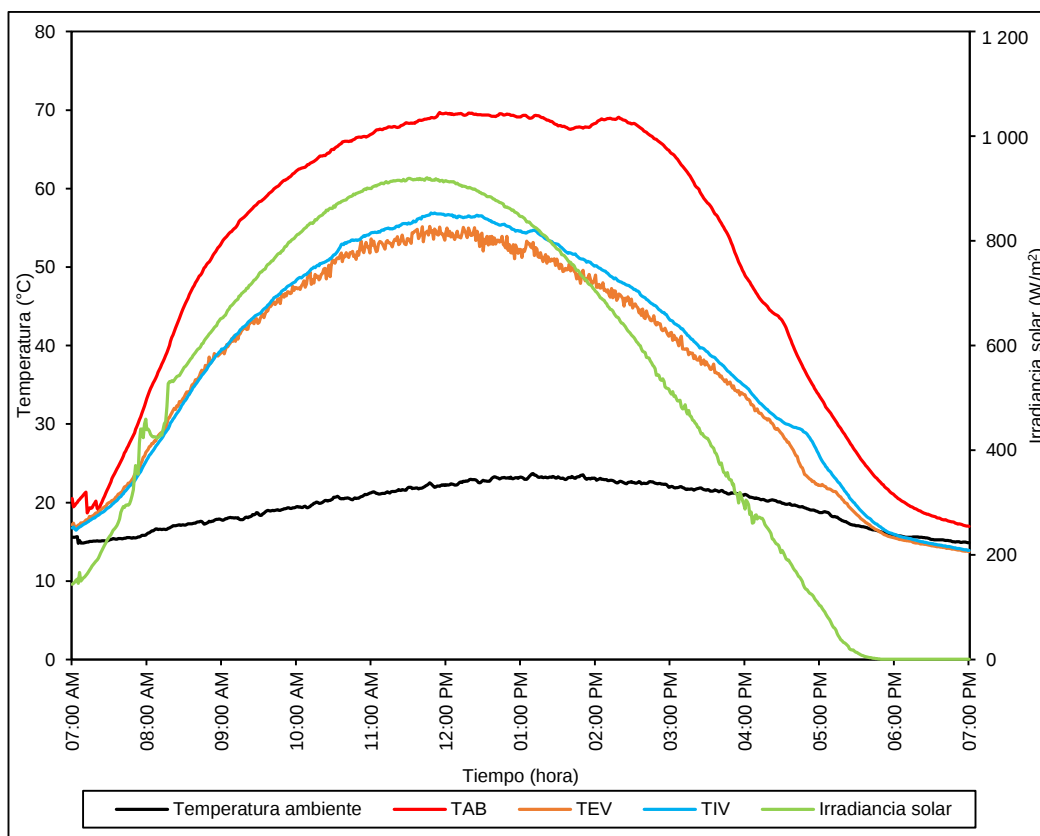


Figura 7

Variación de temperatura del destilador solar con grava de 1 cm de profundidad en función de las horas del día e irradiancia solar (W/m^2), promedio del 22 al 25 de septiembre de 2025

En la Figura 8 se presenta el comportamiento térmico del destilador solar con grava y 3 cm de profundidad (18 L). A diferencia del caso anterior, el mayor volumen de agua genera un incremento térmico más lento durante las primeras horas del día, alcanzando sus valores máximos entre las 11:00 y 15:00 h, con un máximo de irradiancia solar de 944 W/m^2 y T_{AMB} de 23°C .

La T_{AB} registró 65 °C, mientras que la T_{IV} y T_{EV} alcanzaron 53 °C y 52 °C, respectivamente.

Sin embargo, el comportamiento nocturno del sistema es distinto. A partir de las 18:00 h, aunque la irradiancia solar disminuye, el descenso de temperatura es más gradual, evidenciando una mayor capacidad de almacenamiento térmico. A las 19:00 h, las temperaturas T_{IV} , T_{EV} y T_{AB} se mantienen 3 °C por encima de la T_{AMB} (15 °C), siendo más notable en la T_{AB} , que conserva valores aproximadamente 10 a 12 °C superiores a la T_{AMB} .

Este comportamiento muestra que, a 3 cm de profundidad, el sistema con el uso de grava retiene mejor la energía térmica acumulada, prolongando el proceso de evaporación durante las horas de baja irradiancia en comparación con profundidades menores (1 cm).

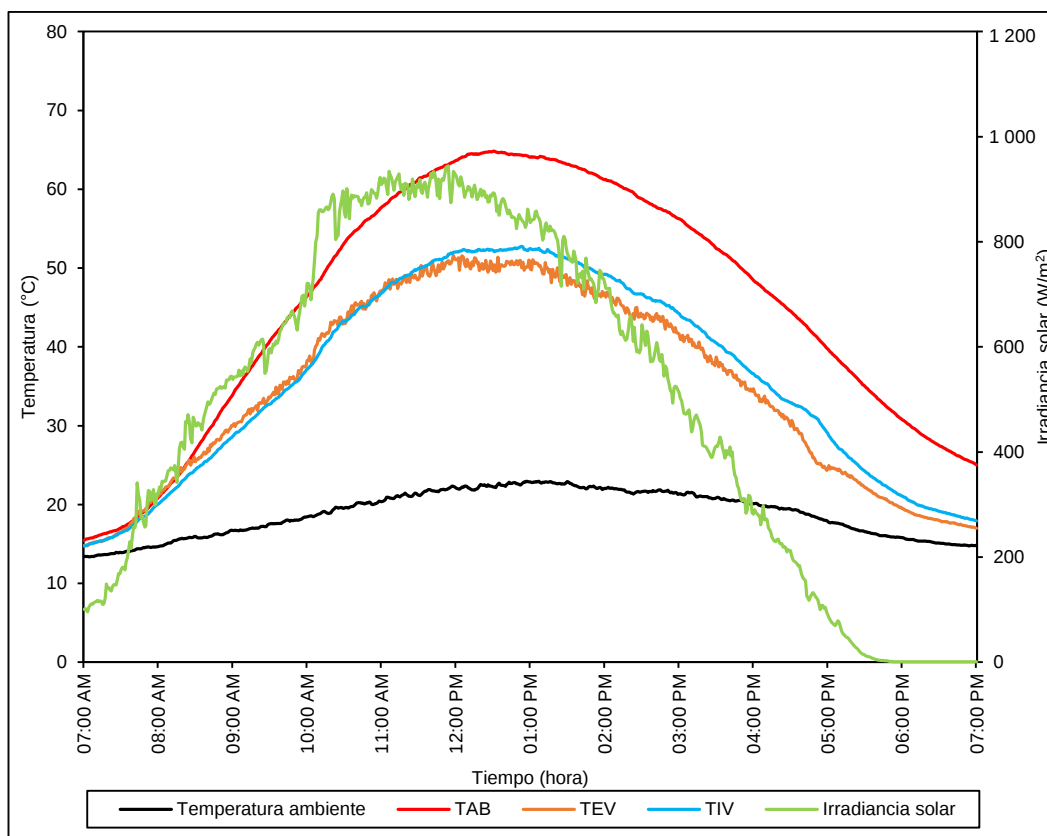


Figura 8

Variación de temperatura del destilador solar con grava de 3 cm de profundidad en función de las horas del día e irradiancia solar (W/m^2), promedio del 28 al 30 de septiembre y 2 de octubre de 2025

La Figura 9 presenta la variación térmica del destilador solar con grava volcánica y 1 cm de profundidad (6 L) durante el periodo de evaluación de 7:00 a 19:00 h. El sistema mostró un rápido incremento de temperatura en horas de la mañana, alcanzando sus valores máximos entre las 10:00 y 14:00 h, cuando la irradiancia solar registró $1\,003\text{ W/m}^2$ y T_{AMB}

de 23 °C, el valor más alto entre los escenarios evaluados. En este intervalo, la T_{AB} alcanzó 68 °C, mientras que la T_{IV} y la T_{EV} registraron 55 °C y 52 °C, respectivamente.

A partir de las 17:30 h, se observa un descenso rápido de las temperaturas internas, asociado a la disminución de la irradiancia solar. Similar al comportamiento observado con grava convencional a 1 cm, la T_{IV} y la T_{EV} descienden hasta valores inferiores a la T_{AMB} , siendo su valor 16 °C hacia las 19:00 h, reflejando una rápida disipación del calor. No obstante, la T_{AB} se mantiene aún entre 2 y 3 °C por encima de la T_{AMB} , lo que indica que el agua conserva parte de la energía térmica acumulada durante el día. Este comportamiento demuestra que, a 1 cm de profundidad, el uso de grava volcánica mejora la captación térmica diurna, pero no evita la rápida pérdida de calor en ausencia de irradiancia.

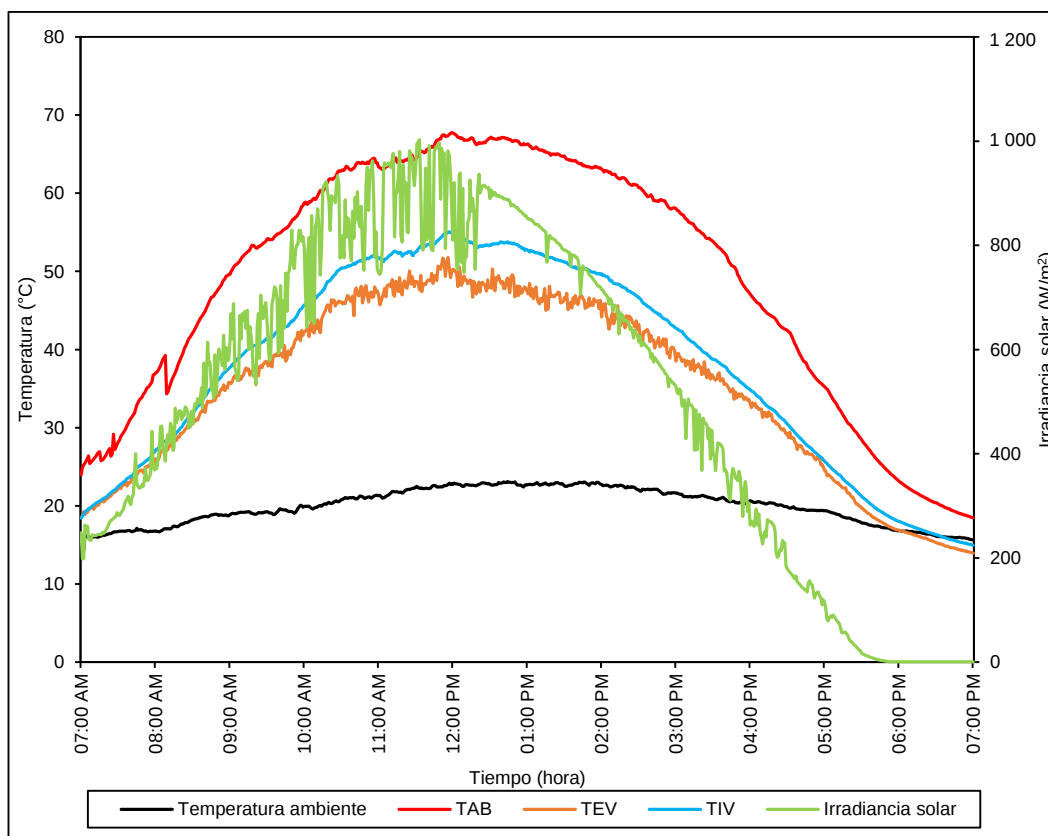


Figura 9

Variación de temperatura del destilador solar con grava volcánica de 1 cm de profundidad en función de las horas del día e irradiancia solar (W/m^2), promedio del 9 al 12 de octubre de 2025

La Figura 10 muestra el comportamiento térmico del destilador solar con grava volcánica y 3 cm de profundidad (18 L). Durante las primeras horas del día, el incremento de temperatura fue más gradual, alcanzando los valores máximos entre las 11:00 y 14:00 h, cuando la irradiancia solar

llegó a 927 W/m^2 y T_{AMB} de 23°C . En estas condiciones, la T_{AB} alcanzó 66°C , mientras que la T_{IV} y T_{EV} registraron 53°C y 50°C , respectivamente.

A partir de las 18:00 h, pese a la disminución progresiva de la irradiancia solar, el sistema presentó una mayor estabilidad térmica en comparación con la profundidad de 1 cm. A las 19:00 h, las temperaturas T_{AB} , T_{IV} y T_{EV} se mantienen de 3 a 5°C por encima de la T_{AMB} (15°C), siendo más evidente en la T_{AB} , que conserva valores aproximadamente 10 a 12°C superiores a la T_{AMB} . Este comportamiento evidencia que la grava volcánica y mayor profundidad permite conservar el calor acumulado y prolongar el proceso de evaporación incluso en ausencia de irradiancia solar.

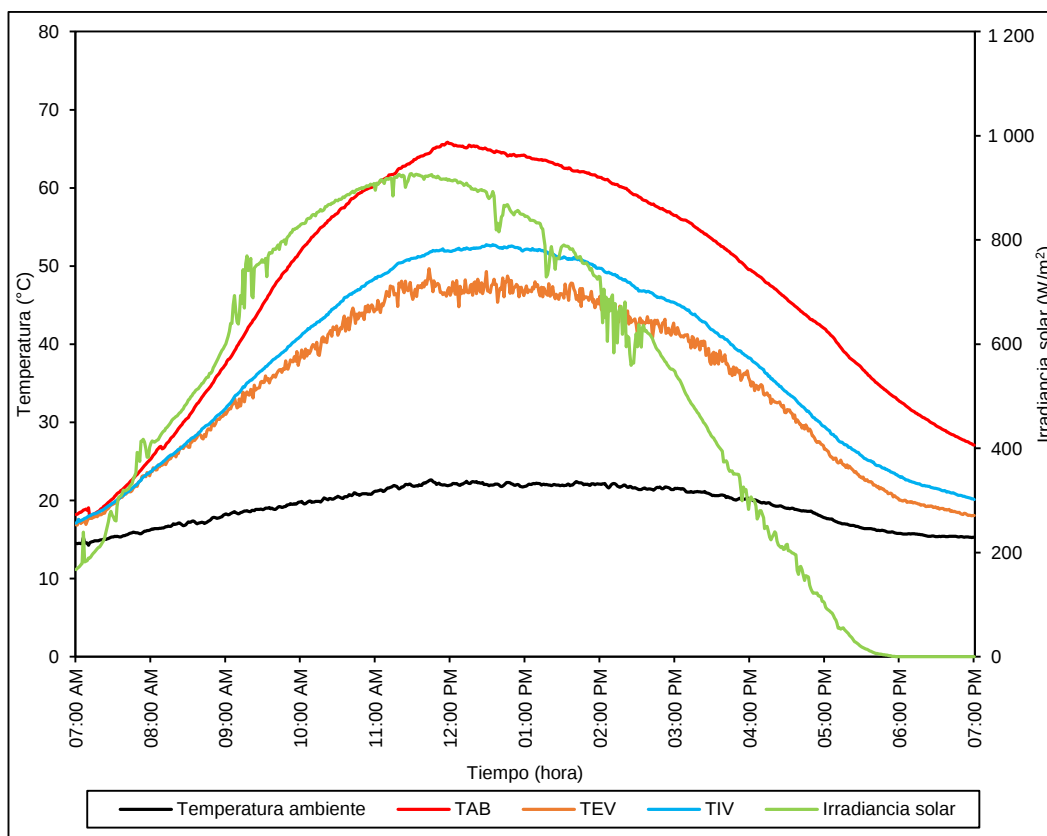


Figura 10

Variación de temperatura del destilador solar con grava volcánica de 3 cm de profundidad en función de las horas del día e irradiancia solar (W/m^2), promedio del 13 al 15 y 17 de octubre de 2025

b) Análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Tukey:
Temperatura del agua en el destilador solar

El análisis de varianza en la Tabla 8 indica que la profundidad del agua (Factor B) tuvo un efecto significativo sobre la temperatura del agua

almacenada en la base de la cubeta ($P < 0,05$), demostrando que este factor influye significativamente en el comportamiento térmico del destilador solar. El tipo de acumulador de calor (Factor A) no presentó diferencia significativa, aunque su valor se encuentra cercano al nivel de significancia. Por otro lado, la interacción entre el tipo de acumulador y la profundidad del agua ($A \times B$) fue significativa. El coeficiente de variabilidad de 2,76 % demuestra la confiabilidad de los resultados.

Tabla 8

Análisis de varianza de la temperatura del agua almacenada en la base de la cubeta del destilador solar en función del tipo de acumulador y la profundidad

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Factor A: Tipo de acumulador de calor	16,00	1	16,00	4,52	0,0550
Factor B: Profundidad del agua	121,00	1	121,00	34,16	0,0001
Factor A x Factor B	30,25	1	30,25	8,54	0,0128
Error	42,50	12	3,54		
Total	209,75	15			

C.V = 2,76 %

Al hallarse diferencia significativa en los resultados para el factor B y su interacción, se efectuó la prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$)

a fin de comparar la temperatura de agua en la cubeta del sistema de destilación solar. En la Tabla 9 se observa la prueba de Tukey, la cual muestra que la profundidad de 1 cm (P1) alcanzó una temperatura promedio mayor (70,88 °C) y se diferenció significativamente de la profundidad de 3 cm (65,38 °C).

Tabla 9

Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) de la temperatura del agua (°C) almacenada en la base de la cubeta del destilador solar a diferentes profundidades de agua residual de salmuera de aceituna

Factor B: Profundidad del agua	Promedio (°C)	Significancia
P1 (1 cm)	70,88	a
P3 (3 cm)	65,38	b

En la Tabla 10 se presenta la combinación de factores, donde el tratamiento grava a 1 cm (GR–P1) obtuvo el mayor promedio de temperatura (73,25 °C), diferenciándose significativamente del resto de tratamientos. Las combinaciones GV–P1, GV–P3 y GR–P3 no presentaron diferencias significativas entre sí.

Tabla 10

Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) de la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$) almacenada en la base de la cubeta del destilador solar: Interacción de factores

Factor A	Factor B	Promedio ($^{\circ}\text{C}$)	Significancia
GR	P1	73,25	a
GV	P1	68,50	b
GV	P3	65,75	b
GR	P3	65,00	b

c) Eficiencia del destilador solar

La Figura 11 muestra que la mayor eficiencia se obtuvo con el destilador solar con grava a 1 cm de profundidad (GR–P1), alcanzando 37,87 %, lo que evidencia un mejor aprovechamiento de la energía solar cuando se combina menor profundidad de agua con este tipo de acumulador. En contraste, GR–P3 presentó la menor eficiencia (26,74 %), indicando que el incremento de la profundidad reduce el desempeño cuando se emplea grava. En el caso de la grava volcánica, se observa un comportamiento diferente, la eficiencia fue mayor a 3 cm (GV–P3: 34,54 %) que a 1 cm (GV–P1: 30,98 %), lo que sugiere una mejor capacidad de almacenamiento y liberación térmica de este material a mayor volumen de agua.

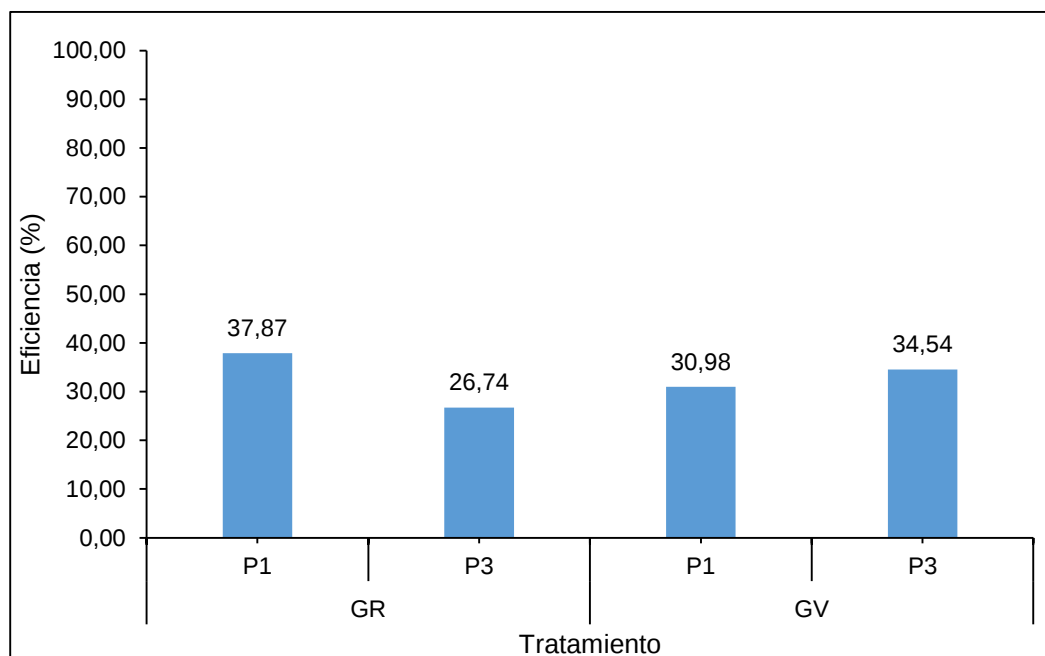


Figura 11

Eficiencia del destilador solar con acumulador de calor y a diferentes profundidades

d) Análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Tukey:

Eficiencia del destilador solar

El análisis de varianza de la Tabla 11 muestra que el tipo de acumulador de calor (Factor A) no tuvo un efecto significativo sobre la eficiencia del destilador solar. La profundidad del agua (Factor B) tampoco presentó diferencia significativa, aunque su valor fue cercano al nivel de significancia ($p = 0,0564$). En contraste, la interacción entre ambos factores ($A \times B$) fue significativa ($p = 0,0015$), indicando que la eficiencia depende

de la combinación entre tipo de acumulador y profundidad del agua. Asimismo, se obtuvo un coeficiente de variabilidad de 11,03 % con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 11

Análisis de varianza de la eficiencia en función del tipo de acumulador y la profundidad

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Factor A: Tipo de acumulador de calor	0,81	1	0,81	0,06	0,8061
Factor B: Profundidad del agua	57,38	1	57,38	4,46	0,0564
Factor A x Factor B	215,94	1	215,94	16,78	0,0015
Error	154,41	12	12,87		
Total	428,54	15			

C.V = 11,03 %

Al obtener diferencia significativa en los resultados para la interacción del factor A x B, se efectuó la prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$). La Tabla 12 indica que GR-P1 presentó la mayor eficiencia (37,87 %), diferenciándose significativamente de GR-P3, que obtuvo la menor eficiencia (26,74 %).

Tabla 12

Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) de la eficiencia (%) del destilador solar: Interacción de factores

Factor A	Factor B	Promedio (%)	Significancia	
GR	P1	37,87	a	
GV	P3	34,54	a	
GV	P1	30,98	a	b
GR	P3	26,74		b

5.1.2 Factor de productividad del destilador construido con acumulador de calor

a) Volumen recuperado de salmuera residual de aceituna verde

La Figura 12 muestra el volumen acumulado de agua recuperada y el factor de productividad del destilador solar con acumulador de calor, utilizando grava (GR) y grava volcánica (GV) a profundidades de 1 cm (6 L) y 3 cm (18 L) de salmuera residual de aceituna verde.

El mayor volumen recuperado se obtuvo con grava a 1 cm (GR–P1), alcanzando 2,15 L/día (3,58 L/m²·día), debido al rápido calentamiento del agua a menor profundidad. En contraste, grava a 3 cm (GR–P3) presentó el menor volumen recuperado, con 1,42 L/día (2,37 L/m²·día), evidenciando que el incremento del volumen de agua en la cubeta de almacenamiento reduce la productividad del sistema. En el caso de la grava volcánica, a 1

cm (GV–P1) se obtuvo 1,72 L/día (2,87 L/m²·día), mientras que a 3 cm (GV–P3) el volumen recuperado aumentó a 1,95 L/día (3,25 L/m²·día).

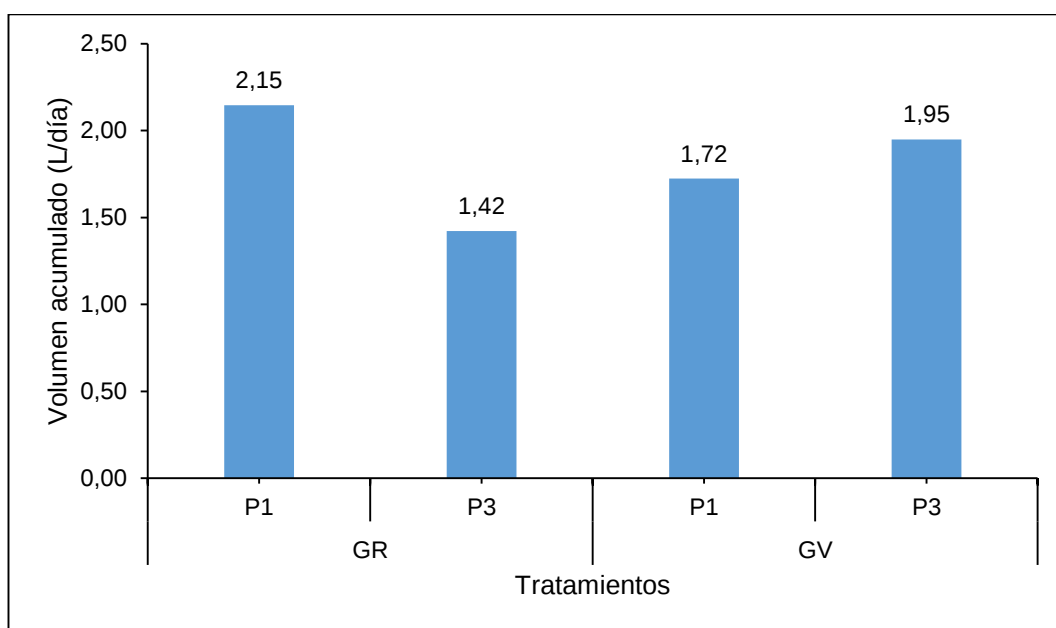


Figura 12

Volumen recuperado de agua de la salmuera residual de aceituna verde mediante destilación solar con acumulador de calor (L/día)

b) Análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Tukey: Factor de productividad

En la Tabla 13 se muestra el análisis de varianza del factor de productividad del destilador solar, donde la profundidad del agua (Factor B) tuvo un efecto significativo sobre el factor de productividad del destilador solar ($p < 0,05$). En contraste, el tipo de acumulador de calor (Factor A) no

presentó diferencia significativa. Sin embargo, la interacción entre el tipo de acumulador y la profundidad del agua ($A \times B$) resultó significativa. En referencia al coeficiente de variabilidad, se obtuvo un valor de 12,33 %.

Tabla 13

Análisis de varianza del factor de productividad del destilador solar en función del tipo de acumulador y la profundidad

F.V	SC	gl	CM	F	p-valor
Factor A: Tipo de acumulador de calor	0,03	1	0,03	0,23	<0,6419
Factor B: Profundidad del agua	0,69	1	0,69	5,01	<0,0450
Factor A x Factor B	2,50	1	2,50	18,09	0,0011
Error	1,66	12	0,14		
Total	4,89	15			

C.V = 12,33 %

Al encontrarse diferencias significativas para el factor profundidad, se aplicó la prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$). En la Tabla 14 se observa que la profundidad de 1 cm (P1) alcanzó un mayor factor de productividad promedio (3,23 L/m²día), diferenciándose significativamente de la profundidad de 3 cm (2,81 L/m²día).

Tabla 14

Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) del factor de productividad ($L/m^2día$) a diferentes profundidades de agua residual de salmuera de aceituna

Factor B: Profundidad del agua	Promedio ($L/m^2día$)	Significancia	
P1 (1 cm)	3,23	a	
P3 (3 cm)	2,81		b

En la Tabla 15, correspondiente a la interacción de factores, se evidencia que el tratamiento grava a 1 cm (GR–P1) obtuvo el mayor factor de productividad ($3,58 L/m^2día$), diferenciándose significativamente del tratamiento grava a 3 cm (GR–P3), que presentó el menor valor ($2,37 L/m^2día$).

Tabla 15

Prueba de rango múltiple de Tukey ($P < 0,05$) del factor de productividad ($L/m^2día$): Interacción de factores

Factor A	Factor B	Promedio ($L/m^2día$)	Significancia	
GR	P1	3,58	a	
GV	P3	3,25	a	
GV	P1	2,88	a	b
GR	P3	2,37		b

5.1.3 Análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas de las muestras de agua residual del procesamiento de aceituna verde antes y después de la destilación

En la Tabla 16 se presentan los resultados del análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas de la salmuera residual de aceituna verde antes de la destilación (Mi) y después del proceso mediante destilador solar con grava (GR) y grava volcánica (GV), los cuales fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles (LMP) para consumo humano establecidos en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, D.S. N.º 031-2010-SA, y con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, categoría 1-A1.

La muestra inicial (Mi) presentó valores elevados en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, superando los LMP y ECA, lo que evidencia que la salmuera residual no es apta para consumo humano ni para usos que requieran calidad ambiental adecuada. Destacan los altos valores de conductividad eléctrica (26 478,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos disueltos totales (15 728,37 mg/L), salinidad (16,24 %) y turbiedad (218,57 NTU), así como concentraciones elevadas de DBO_5 y DQO, propias de residuos líquidos del procesamiento de aceituna verde.

Tras el proceso de destilación solar, tanto la muestra obtenida con grava (GR) como con grava volcánica (GV) mostraron una reducción de sales y sólidos disueltos, alcanzando valores de conductividad eléctrica inferiores a 100 $\mu\text{S/cm}$, sólidos disueltos totales menores a 50 mg/L, salinidad cercana a 0,03 % y turbiedad menor a 1 NTU, cumpliendo con los LMP y ECA categoría 1-A1. Excepto el pH, que se mantuvo en valores ácidos y fuera de los límites permisibles. Las eficiencias de remoción en estos parámetros superaron el 99 % en ambos tratamientos.

En cuanto a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y la demanda química de oxígeno (DQO), se observó una reducción posterior a la destilación. La muestra GR presentó valores de 2 mg/L de DBO_5 y 10 mg/L de DQO, cumpliendo con el ECA categoría 1-A1. En la muestra GV, si bien se evidenció una disminución respecto a la muestra inicial, los valores de DBO_5 y DQO fueron mayores al rango de LMP y ECA, reflejándose en una eficiencia de remoción menor en comparación con GR.

Respecto a los parámetros microbiológicos, la destilación solar permitió reducir los coliformes fecales y totales hasta 1,8 NMP/100 ml en ambas muestras destiladas, cumpliendo con los LMP para consumo humano y con los ECA categoría 1-A1, alcanzando eficiencias de remoción superiores al 75 %.

Tabla 16

Análisis de las características fisicoquímicas y microbiológicas de muestras de agua residual del procesamiento de aceituna verde antes y después de la destilación solar

Parámetro	Unidad	Muestra			LMP	ECA	Eficiencia (%)	
		Mi	GR	GV			GR	GV
Fisicoquímico								
pH	pH	4,25	3,41	3,06	6,5	8,5	-	-
Conductivida d eléctrica	μS/cm	26 478,30	77,53	83,17	1 500	1 500	99,71	99,69
Solidos Disueltos Totales	mg/L	15 728,37	37,27	46,10	1 000	1 000	99,76	99,71
Salinidad	%	16,24	0,03	0,04	-	-	99,79	99,77
Turbiedad	NTU	218,57	0,80	0,40	5	5	99,63	99,82
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	5 707,5	2	1 167,50	-	3	99,96	79,54
Demanda química de oxígeno	mg/L	7 714,3	10	2 452,7	-	10	99,87	68,21
Microbiológico								
Coliformes fecales	NMP/ 100 ml	7,8	1,8	1,8	< 1,8	20	76,92	76,92
Coliformes totales	NMP/ 100 ml	13	1,8	1,8	< 1,8	50	86,15	86,15

Nota. Mi: Muestra inicial, GR: Muestra de agua destilada con aplicación de grava,

GV: Muestra de agua destilada con aplicación de grava volcánica.

5.2 Discusión de resultados

5.2.1 Evaluación de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con acumulador de calor

Los resultados obtenidos evidencian que el desempeño térmico del destilador solar está influenciado por la irradiancia solar, la profundidad del agua y el tipo de acumulador de calor. El destilador solar alcanzó una máxima temperatura en el agua almacenada en la base de la cubeta (T_{AB}) de 70 °C cuando la irradiancia solar osciló entre 921 y 1 003 W/m². Ello se explica por el elevado potencial energético de la región, estimado en 6,01 kWh/m²·día, que favorece un rápido calentamiento de las superficies de captación (Polo & Pérez, 2020). Resultados comparables fueron reportados por Perca (2023) quien alcanzó temperaturas máximas de 73 °C en destiladores de una vertiente en Tacna, confirmando que la irradiancia solar es el parámetro meteorológico más determinante en la productividad del sistema. Asimismo, Dueñas (2021) señala que la irradiación solar define la energía disponible para promover la evaporación, lo que respalda la relación directa observada entre irradiancia y aumento térmico en este estudio.

En cuanto a la profundidad del agua, los ensayos demostraron que a 1 cm (6 L) el sistema presenta un rápido incremento de temperatura

durante la mañana, alcanzando máximos térmicos en menor tiempo. Este comportamiento responde a la menor masa térmica del agua, lo que facilita una rápida absorción de energía y acelera el proceso de evaporación, tal como lo indican Santos et al. (2017) quienes establecen que la eficiencia térmica es inversamente proporcional al nivel del agua. Sin embargo, esta condición también conduce a una rápida pérdida de calor al disminuir la irradiancia solar, evidenciada en el descenso de la temperatura de la superficie interior de la cubierta de vidrio (T_{IV}) y temperatura de la superficie exterior de la cubierta de vidrio (T_{EV}) hasta valores cercanos o inferiores a la temperatura ambiente (T_{AMB}) hacia las 19:00 h.

Por el contrario, a 3 cm de profundidad (18 L), el calentamiento fue más gradual, pero el sistema mostró una mayor estabilidad térmica al anochecer, manteniendo la T_{AB} entre 10 y 12 °C por encima de la T_{AMB} . Ello concuerda con lo reportado por Perca (2025) quien describe que mayores profundidades actúan como un amortiguador térmico, reduciendo la temperatura operativa inicial, pero favoreciendo la retención de energía. Al-Mezeini et al. (2023) refuerzan esta interpretación al concluir que el incremento de la profundidad disminuye la temperatura máxima alcanzada, pero prolonga el proceso de evaporación durante periodos de baja irradiancia.

Respecto al uso de grava y grava volcánica como materiales de almacenamiento de energía (ESM), los resultados evidencian que ambos contribuyen a prolongar el proceso de destilación, manteniendo la T_{AB} por encima de T_{AMB} incluso tras el descenso de la irradiancia solar. Karthick et al. (2022) explican que los lechos de piedra absorben el exceso de energía durante las horas de mayor radiación y la liberan de forma progresiva, mejorando la productividad hasta en un 18,6 % respecto a sistemas convencionales. En este estudio, dicha función se confirmó experimentalmente, especialmente en los tratamientos a mayor profundidad. Panchal (2016) destaca que materiales como la grava negra y las rocas volcánicas son altamente eficientes debido a su elevada emisividad y capacidad para mantener el equilibrio térmico con el fluido.

En términos de eficiencia del destilador solar, el mayor valor se obtuvo en GR-P1 (37,87 %), superando el rango típico de eficiencia de los destiladores solares simples (20–30 %). Este resultado es comparable con el 29,4 % reportado por Dueñas (2021) y el 30 % obtenido por Al-Mezeini et al. (2023) lo que evidencia un desempeño térmico favorable del sistema evaluado. La elevada eficiencia en GR-P1 se explica por el rápido calentamiento del bajo volumen de agua, que maximiza la evaporación durante el periodo diurno.

Un hallazgo relevante de esta investigación es que la grava volcánica presentó mayor eficiencia a 3 cm (34,54 %) que a 1 cm (30,98 %), lo que sugiere que este material optimiza sus propiedades termofísicas cuando interactúa con mayores volúmenes de agua. Este comportamiento coincide con lo señalado por Mevada et al. (2022) quienes indican que los materiales oscuros de almacenamiento térmico incrementan la eficiencia exergética del sistema, logrando mejoras de hasta 72,6 % frente a destiladores convencionales. En contraste, Sanga (2023) reportó eficiencias considerablemente menores (11,16 %) al tratar residuos de aceituna sin el uso de almacenadores térmicos optimizados, lo que resalta la importancia del uso de grava y grava volcánica en el diseño del destilador evaluado.

5.2.2 Factor de productividad del destilador construido con acumulador de calor

Los resultados obtenidos evidencian que el factor de productividad del destilador solar está influenciado por la profundidad del agua y el tipo de acumulador térmico. El mayor volumen recuperado se registró con grava a 1 cm de profundidad (GR-P1), alcanzando 2,15 L/día, equivalente a un factor de productividad de 3,58 L/m²·día. Este valor se encuentra dentro del rango superior reportado para destiladores solares de una vertiente sin mejoras complejas, como la investigación Escandón & Fernández (2021)

que obtuvieron una producción diaria de 1,5 L/día empleando un destilador de dimensiones mayores, mientras que Santos et al. (2017) reportaron productividades asociadas principalmente a la radiación solar, sin superar los 3,0 L/m²·día en sistemas convencionales. Asimismo, Bedoya & Chaparro (2018) alcanzaron volúmenes de 355 ml/día en un destilador tipo caja para agua de mar, valor considerablemente inferior al obtenido en el presente estudio, lo que demuestra la ventaja del uso de acumuladores térmicos.

En el contexto regional, los 3,58 L/m²·día logrados en GR-P1 se aproximan a los 3,05 L/m²·día reportados por Polo & Pérez (2020) en Tacna, quienes utilizaron superficies reflectoras adicionales y mayores volúmenes de agua. De igual forma, Perca (2023) reportó factores de producción de 5,66 L/m²·día bajo condiciones optimizadas de diseño, indicando que el valor alcanzado en este estudio se sitúa dentro de un rango alto para configuraciones con acumulador pasivo de calor.

Al incrementar la profundidad a 3 cm con grava convencional (GR-P3), la productividad disminuyó a 2,37 L/m²·día, comportamiento que coincide con lo reportado por Al-Mezeini et al. (2023) quienes observaron que profundidades mayores reducen la productividad diurna inicial, aun cuando mejoran la estabilidad térmica del sistema. De manera similar, Dueñas (2021) reportó una producción de 2,29 L/m²·día en Lima, valores

cercanos a los obtenidos en esta configuración, lo que refuerza que el incremento del volumen de agua tiende a penalizar la producción instantánea.

Un resultado distintivo de esta investigación es el desempeño de la grava volcánica, particularmente a 3 cm de profundidad (GV-P3), donde se alcanzó un factor de productividad de 3,25 L/m²·día, superando al obtenido a 1 cm (2,87 L/m²·día). Este comportamiento coincide con lo señalado por Panchal (2016) quien reporta incrementos de productividad de hasta 60 % al emplear rocas volcánicas y materiales oscuros de alta inercia térmica, capaces de mantener temperaturas más estables durante periodos de baja irradiancia. Asimismo, Mevada et al. (2022) demostraron que la incorporación de materiales sólidos de almacenamiento térmico permitió incrementar la producción de 1,4 a 2,5 kg/m²·día, valores comparables a los factores de producción obtenidos en el presente estudio cuando se emplea grava volcánica.

En contraste, Sanga (2023) obtuvo una destilación diaria máxima de 966 ml y una eficiencia de 11,16 % al tratar residuos líquidos de aceituna sin acumuladores térmicos optimizados, evidenciando que la productividad lograda en esta investigación es entre 2 y 3 veces mayor, pese a trabajar con un residuo complejo y salino.

5.2.3 Análisis de características fisicoquímicas y microbiológicas

La salmuera residual de aceituna verde analizada en este estudio presentó una alta complejidad fisicoquímica, evidenciada por una conductividad eléctrica de 26 478,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólidos disueltos totales de 15 728,37 mg/L y una salinidad de 16,24 %, valores que superan ampliamente los ECA para agua categoría 1-A1 y los LMP para consumo humano. Esta condición coincide con lo reportado por Sanga (2023), quien describe los residuos líquidos del macerado de aceituna como efluentes con elevada carga salina y orgánica, no aptos para vertimiento ni consumo sin tratamiento previo.

Tras la destilación solar, tanto el tratamiento con grava (GR) como con grava volcánica (GV) lograron una reducción superior al 99 % en conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, alcanzando valores inferiores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 50 mg/L, respectivamente. Estos resultados son comparables con los obtenidos por Dueñas (2021), quien reportó una remoción del 99,74 % de la conductividad eléctrica mediante un destilador solar mejorado, y confirman que la destilación solar es altamente eficiente para la separación de sales no volátiles, incluso cuando se trata de matrices residuales complejas.

En relación con la materia orgánica, el comportamiento de los tratamientos fue diferenciado. El destilador con grava convencional (GR) redujo la DBO₅ hasta 2 mg/L y la DQO hasta 10 mg/L, cumpliendo con el ECA categoría 1-A1. Este resultado es consistente con lo reportado por Dueñas (2021), quien también obtuvo valores finales de DBO₅ dentro de los rangos normativos tras la destilación solar, y demuestra que el proceso puede ser eficaz para la remoción de carga orgánica cuando el sistema no favorece el arrastre de compuestos volátiles.

En contraste, el tratamiento con grava volcánica (GV), si bien redujo significativamente la DBO₅ y la DQO respecto a la muestra inicial, no logró cumplir los valores normativos, registrando 1 167,50 mg/L de DBO₅ y 2 452,7 mg/L de DQO. Este comportamiento es coherente con lo observado por Sanga (2023) quien reportó concentraciones elevadas de materia orgánica residual tras la destilación de efluentes de aceituna, atribuidas a la presencia de compuestos fenólicos característicos de este tipo de residuos. En este sentido, los resultados sugieren que el comportamiento térmico prolongado de la grava volcánica podría favorecer el arrastre de compuestos orgánicos volátiles hacia el destilado, reduciendo la eficiencia de remoción orgánica.

Un aspecto relevante es el descenso del pH posterior a la destilación, desde 4,25 en la muestra inicial hasta valores de 3,41 (GR) y

3,06 (GV). Este resultado difiere de lo reportado por Escandón & Fernández (2021); Karthick et al. (2022), quienes obtuvieron valores de pH cercanos a la neutralidad al destilar agua salobre y agua de mar. La diferencia se explica por la naturaleza del efluente tratado, ya que, como señala Sanga (2023) los residuos del procesamiento de aceituna contienen ácidos orgánicos y compuestos fenólicos que pueden transferirse al destilado, especialmente cuando se alcanzan temperaturas elevadas durante periodos prolongados.

Desde el punto de vista microbiológico, ambos tratamientos fueron efectivos, reduciendo los coliformes totales y fecales hasta 1,8 NMP/100 ml, cumpliendo con los LMP para consumo humano y los ECA categoría 1-A1. Este resultado es consistente con lo reportado por Córdova et al. (2023); Escandón & Fernández (2021), quienes demostraron que la destilación solar permite obtener agua libre de contaminación microbiológica, debido a la combinación de altas temperaturas y radiación solar durante el proceso.

CONCLUSIONES

Se evaluó el desempeño de un destilador solar tipo cubeta de una vertiente con acumulador de calor en la recuperación de agua a partir de salmuera residual del procesamiento de aceituna verde en la ciudad de Tacna, determinándose que el sistema estuvo condicionado principalmente por la irradiancia solar, la profundidad del agua y su interacción con el acumulador de calor, siendo una alternativa para la recuperación de aguas residuales agroindustriales en zonas áridas.

El destilador solar tipo cubeta de una vertiente presentó un adecuado comportamiento térmico, alcanzando temperaturas del agua de hasta 70 °C bajo irradiancias entre 921 y 1 003 W/m². La mayor eficiencia térmica se obtuvo con grava a 1 cm de profundidad (GR-P1), alcanzando un valor de 37,87 %, evidenciando un mejor aprovechamiento de la energía solar cuando se combina un bajo volumen de agua con este tipo de acumulador. A una profundidad de 1 cm, el sistema mostró un calentamiento rápido y mayores temperaturas diurnas, mientras que a 3 cm se evidenció una mayor estabilidad térmica durante horas de baja irradiancia, demostrando la influencia directa de la profundidad del agua en el desempeño térmico del destilador.

La determinación del factor de productividad evidenció que el mayor factor de productividad se obtuvo con grava a 1 cm de profundidad (GR-P1), con 3,58 L/m²·día, debido al rápido calentamiento del bajo volumen de agua. El incremento de la profundidad a 3 cm redujo la productividad cuando se utilizó grava convencional. En contraste, la grava volcánica presentó mayor productividad a 3 cm (3,25 L/m²·día), evidenciando una mejor capacidad de almacenamiento y liberación térmica a mayor volumen de agua; por lo que el uso de acumuladores de calor permite adaptar el destilador solar según el objetivo operativo, ya sea maximizar la producción inmediata o prolongar la recuperación de agua durante periodos de baja o nula irradiancia.

La destilación solar permitió una remoción superior al 99 % de sales, sólidos disueltos, conductividad eléctrica y turbiedad, logrando que el agua destilada cumpla con los ECA categoría 1-A1 y con los LMP para consumo humano en los parámetros evaluados. Asimismo, se alcanzó una reducción efectiva de coliformes totales y fecales hasta < 1,8 NMP/100 ml, evidenciando la eficacia del proceso térmico. No obstante, se observaron diferencias en la remoción de materia orgánica y pH entre los acumuladores evaluados, lo que sugiere la necesidad de un tratamiento complementario para aplicaciones de consumo humano directo.

RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se recomienda optimizar el diseño y la operación del destilador solar tipo cubeta de una vertiente mediante la evaluación de diversos parámetros de diseño y operación (reflectores internos y externos, la variación del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio, la comparación de distintas cantidades y materiales de acumulación de calor.

Se sugiere replicar la evaluación del destilador solar en diferentes épocas del año y bajo distintas condiciones climáticas, con el propósito de validar su desempeño y estabilidad operativa en escenarios reales de aplicación en la región de Tacna.

Se recomienda evaluar alternativas de manejo del residuo concentrado generado tras la destilación solar de la salmuera residual de aceituna verde, orientadas a la recuperación de sales o a su disposición final controlada, para minimizar impactos ambientales.

Se sugiere ampliar el análisis de la calidad del agua recuperada, incorporando más parámetros asociados a la salmuera de aceituna verde.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdallah, S., Abu-Khader, M. M., & Badran, O. (2009). Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills. *Desalination*, 242(1–3), 128–137.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.036>
- Abujazar, M. S. S., Fatimah, S., Rakmi, A. R., & Shahrom, M. Z. (2016). The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review. In *Desalination* (Vol. 385, pp. 178–193). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.025>
- Al-Hayeka, I., & Badran, O. O. (2004). The effect of using different designs of solar stills on water distillation. *Desalination*, 169(2), 121–127.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.013>
- Al-Mezeini, S. S. S., Siddiqui, M. A., Shariq, M., Althagafi, T. M., Ahmed, I. A., Asif, M., Alsufyani, S. J., Algarni, S. A., Ahamed M.B, N., Elamin, K. M. A., Alaghaz, A. N. M. A., & Gomaa, M. M. (2023). Design and experimental studies on a single slope solar still for water desalination. *Water (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/w15040704>
- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y Establecen Disposiciones Complementarias, Pub. L. No. DS N° 004-

2017-MINAM, El Peruano 10 (2017). <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>

Arunkumar, T., Raj, K., Winfred, D., Denkenberger, D., Tingting, G., Xuan, L., & Velraj, R. (2019). A review of efficient high productivity solar stills. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 101, pp. 197–220). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.013>

Bansal, G., Singh, D., Kishore, C., & Dogra, V. (2019). Effect of absorbing material on the performance of solar still: A mini review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1884–1887. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.412>

Barco, E., & Pereda, J. (2021). *Potabilización del agua de mar mediante destilador solar en Ancón - Lima 2021* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/98945>

Bedoya, E., & Chaparro, E. (2018). Uso de un destilador solar tipo caja para la obtención de agua destilada del mar de Ilo, 2018. *Revista Ciencia y Tecnología - Para El Desarrollo*, 9–12. <https://doi.org/10.37260/rctd.v4i0.114>

Bellila, A., Kabeel, A. E., Attia, M. E. H., Dahab, H. A., & Elazab, M. A. (2024). Maximizing solar distillation performance for conical solar still

through varied energy storage materials. *Scientific Reports*, 14(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-79907-w>

Bhattacharyya, A. (2013). Solar Stills for Desalination of Water in Rural Households. *International Journal of Environment and Sustainability*, 2(1), 21–30.

https://www.researchgate.net/publication/257688255_Solar_Stills_for_Desalination_of_Water_in_Rural_Households

Córdova, P., Zuzunaga, R., Barrios, T., Córdova, I., Zuzunaga, E., & Diaz, S. (2023). Destilador solar de tipo una vertiente y la purificación de la calidad del agua, Ica. *Revista Alfa*, 7(21), 511–529.
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i21.232>

De La Cruz, L., & Fuster, T. (2021). *Destilador solar como método sostenible para la purificación de aguas grises, Los Olivos, 2021* [Universidad Cesar Vallejo].

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/85736>

Del Pino, S. (2016). *Proceso de la aceituna estilo californiano mediante el reuso de la soda cáustica proveniente del tratamiento alcalino de la preparación de aceituna verde sevillana en la provincia de Tacna, año 2015* [Universidad Privada de Tacna].

<https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/88>

- Dermeche, S., Nadour, M., Larroche, C., Moulti-Mati, F., & Michaud, P. (2013). Olive mill wastes: Biochemical characterizations and valorization strategies. In *Process Biochemistry* (Vol. 48, Issue 10, pp. 1532–1552). <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.07.010>
- Dueñas, R. (2021). *Rendimiento de un destilador solar mejorado para la desalinización de agua en el distrito de Jesus Maria (Lima-Perú)* [Universidad Científica del Sur]. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/2282>
- Duffie, J. A. ., Beckman, W. A. ., & Blair, Nate. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. Wiley. <https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/SolarPowerForAfrica/Solar%20Engineering%20of%20Thermal%20Processes,%20Photovoltaics%20and%20Wind.pdf>
- Escandón, M., & Fernández, D. (2021). *Diseño de un prototipo de destilador solar para la obtención de agua apta para consumo humano en una familia* [Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21428>
- Grewal, R., Manchanda, H., & Kumar, M. (2018). A review on applications of phase change materials in solar distillation. In *2nd International Conference on Emerging Trends in*.

https://www.researchgate.net/publication/328041514_A_review_on_applications_of_phase_change_materials_in_solar_distillation

INEI. (2023). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2023*.
<https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/4963255-peru-anuario-de-estadisticas-ambientales-2023>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, Technical Summary, Frequently Asked Questions and Glossary*. Cambridge University Press. www.ipcc.ch

Jathar, L. D., Ganesan, S., Shahapurkar, K., Soudagar, M. E. M., Mujtaba, M. A., Anqi, A. E., Farooq, M., Khidmatgar, A., Goodarzi, M., & Safaei, M. R. (2022). Effect of various factors and diverse approaches to enhance the performance of solar stills: a comprehensive review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(7), 4491–4522.
<https://doi.org/10.1007/s10973-021-10826-y>

Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., & Eisa, A. (2019). Effect of graphite mass concentrations in a mixture of graphite nanoparticles and paraffin wax as hybrid storage materials on performances of solar still. *Renewable Energy*, 132, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.147>

- Kabeel, A. E., & El-Agouz, S. A. (2011). Review of researches and developments on solar stills. In *Desalination* (Vol. 276, Issues 1–3, pp. 1–12). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.042>
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M., & Essa, F. A. (2017). Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 75, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.017>
- Kalidasa, K., & Srithar, K. (2011). Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water. *Renewable Energy*, 36(2), 612–620. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.009>
- Karthick, M., Joe, S., Appadurai, M., & Jeshurun, S. (2022). Productivity Enhancement of a Single Slope Solar Still with Energy Storage Medium. *Materials Today: Proceedings*, 60, 889–893. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.548>
- Krishna, R., Prakash, S., Dwivedi, J., & Dwivedi, H. (2017). Comparative Performance evaluation of an active/passive solar Distillation system. *Materials Today: Proceedings*, 4, 2822–2831. www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings

Kumar, A., & Shukla, S. K. (2015). A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application. *Energy Procedia*, 74, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.728>

Kumar, V., Shukla, K., & Singh, P. (2022). A systematic review for performance augmentation of solar still with heat storage materials: A state of art. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 47). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103578>

Limache, F. (2021). *Evaluación comparativa de lechuga de agua (Pistia stratiotes) y jacinto de agua (Eichhornia crassipes) para el tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Tacna* [Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNJB_b149458476e6f095275b7ccb3aa11fd3

López, R. (2007). *Características y tratamiento de las aguas residuales de la industria de aderezo de aceituna de mesa*. <https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente48093.pdf>

Manchanda, H., & Kumar, M. (2015). A comprehensive decade review and analysis on designs and performance parameters of passive solar

still. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2(1).

<https://doi.org/10.1186/s40807-015-0019-8>

Mevada, D., Panchal, H., Ahmadein, M., Zayed, M. E., Alsaleh, N. A., Djuansjah, J., Moustafa, E. B., Elsheikh, A. H., & Sadasivuni, K. K. (2022). Investigation and performance analysis of solar still with energy storage materials: An energy- exergy efficiency analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 29.

<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101687>

Miranda, J. (2018). *Factores que intervienen en la contaminación del suelo por aguas residuales del proceso de fermentación de aceitunas verdes estilo Sevillana en el distrito de la Yarada Los Palos, región de Tacna, 2017* [Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann].

<https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/e4050fb0-e127-4e79-8940-9233e00eac90>

OMS. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (Fourth).

<https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/69c17edd-ee26-425b-9d34-33799377e886/content>

OMS. (2023). *Progress on household drinking-water, sanitation and hygiene 2000-2022: Special focus on gender* (S. and H. WHO/UNICEF

Joint Monitoring Programme for Water Supply, Ed.).
<https://washdata.org>

Panchal, H. (2016). Use of thermal energy storage materials for enhancement in distillate output of solar still: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 61, pp. 86–96). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.043>

Panchal, H., & Patel, P. (2016). Energy absorbing materials used in solar still for enhancement in distillate output: a review. In *International Journal of Ambient Energy* (Vol. 37, Issue 5, pp. 528–540). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/01430750.2014.991839>

Pastor, L., Doñate, S., Ferrer, E., Mendoza, J., & Iborra, A. (2014). Alternativas para el tratamiento de salmueras procedentes del procesado de aceitunas: procesos químicos y biológicos. *Tecnoaqua*, 1–7. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/15fe66d7-3a38-4a03-9c0a-aba0e965daee/content>

Perca, D. (2023). *Evaluación comparativa de destiladores solares tipo cubeta en la eficiencia de producción/purificación de aguas grises en la ciudad de Tacna* [Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/collections/e6607d63-faa8-4585-836c-a9196e456157>

- Perca, D. (2025). *Efecto de parámetros de diseño en el factor de producción de un destilador solar de una vertiente en la destilación de agua de mar en Tacna* [Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/76dbb6b9-9fe1-41a8-b35f-0084cae1a5b5>
- Polo, C. (2013). *Potencial energético solar y su impacto ambiental en la región Tacna* [Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/server/api/core/bitstreams/8a444e68-0fe8-4a70-a34f-1e0e62fe5f1c/content>
- Polo, C., & Pérez, A. (2020). Construcción y caracterización de un destilador solar de una vertiente con superficie reflectora. *Ciencia*, 4, 3–13. <https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cs/article/view/981>
- Reglamento de La Calidad Del Agua Para Consumo Humano, Pub. L. No. DS No 031-2010-SA, Diario el Peruano 1 (2010). https://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/Reglamento_Calidad_Agua%20D.S%20N%C2%B0031-2010-SA.pdf
- Rodríguez, E. (2021). *Comparación de tres destiladores solares para la obtención de agua destilada de mar en Tacna, 2019* [Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann].

<https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/0ce1d98b-5b8b-441a-8721-e574ff91f95c>

Sanga, M. (2023). *Recuperación de agua de los residuos líquidos del proceso de macerado de la aceituna con un destilador solar de una vertiente en la ciudad de Tacna* [Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/collections/e6607d63-faa8-4585-836c-a9196e456157>

Santos, A., Hernandez, E., & Ramírez, Z. (2017). Experimental evaluation of a single slope solar still. *TECCIENCIA*, 12(22), 63–71. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.22.7>

Shah, R., Makwana, M., Makwana, N., & Desai, R. (2023). Performance analysis of black gravel solar still. *Materials Today: Proceedings*, 72, 1000–1006. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.115>

Tiwari, G. N., & Tiwari, A. (2016). *Handbook of solar energy: Theory, Analysis and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0807-8>

VIDENZA. (2024). *Manejo de los recursos hídricos en Tacna*. <https://videnzainstituto.org/propuestasdelbicentenario/nuestras-propuestas/#agua>

Villena, J. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 304. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>

World Meteorological Organization. (2021). *Guide to Climatological Practices (OMM-No 100)*. <https://community.wmo.int/draft-fourth-edition-of-guide-climatological-practices-wmo-no-100>

Zine, B., Abdelhamid, L., Sellami, M., & Hamza, B. (2023). Experimental Study to Improve the Solar Desalination Performance Using Local Heat Storage Material. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 45(2), 154–163. <https://doi.org/10.3103/s1063455x2302011x>

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

Formulación del problema	Hipótesis específica	Objetivos específicos	Variables	Dimensiones	Indicadores	Métodos	Pruebas estadísticas
¿Cuál es la eficiencia del destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde?	El destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor presenta una eficiencia adecuada en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde.	Determinar la eficiencia del destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor en la recuperación de agua a partir de la salmuera residual de aceituna verde.	Independiente: X1: Sistema de destilación solar con acumulador de calor Dependiente: Y1: Eficiencia del sistema Interviniente: Z1= Condiciones climáticas	Parámetros de operación de Almacenamiento térmico Eficiencia de recuperación Parámetros meteorológicos incidentes	Tipo de acumulador de calor (grava, grava volcánica) (kg) Profundidad de la salmuera residual (cm) Temperatura (°C) Eficiencia (%) Irradiancia solar incidente en plano horizontal (W/m ²) Temperatura ambiente (°C)	Medición directa Medición directa con sensores de termocupla Medición indirecta mediante ecuación 1 Medición directa con piranómetro y sensor de temperatura	Diseño factorial 2x2 con cuatro repeticiones, análisis de varianza y prueba de contraste múltiple de Tukey a un 95 % de confianza.
¿Cuál es el factor de productividad del destilador solar tipo cubeta considerando el uso de acumuladores de calor en la recuperación de agua?	El factor de productividad del destilador solar tipo cubeta varía en función del uso del acumulador de calor empleado durante el proceso de recuperación de agua.	Determinar el factor de productividad del destilador solar tipo cubeta con acumulador de calor.	Independiente: X1: Sistema de destilación solar con acumulador de calor Dependiente: Y1: Factor de productividad Interviniente: Z1= Condiciones climáticas	Parámetros de operación de Almacenamiento térmico Producción de agua destilada Parámetros meteorológicos incidentes	Tipo de acumulador de calor (grava, grava volcánica) (kg) Profundidad de la salmuera residual (cm) Volumen (L) Factor de productividad (L/m ² día) Irradiancia solar incidente en plano horizontal (W/m ²) Temperatura ambiente (°C)	Medición directa Medición directa de volumen con probeta Medición indirecta mediante ecuación 2 Medición directa con piranómetro y sensor de temperatura	Diseño factorial 2x2 con cuatro repeticiones, análisis de varianza y prueba de contraste múltiple de Tukey a un 95 % de confianza.

Formulación del problema	Hipótesis específica	Objetivos específicos	Variables	Dimensiones	Indicadores	Métodos	Pruebas estadísticas
¿Cómo varían las características fisicoquímicas y microbiológicas de la salmuera residual de aceituna verde antes y después del proceso de recuperación de agua mediante destilación solar con acumulador de calor?	El proceso de destilación solar con acumulador de calor permite mejorar las características fisicoquímicas y microbiológicas de la salmuera residual de aceituna verde, obteniéndose agua que cumple con la normativa vigente para consumo humano.	Analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas de las muestras de agua residual del procesamiento de aceituna verde antes y después de la recuperación.	Independiente: X1: Agua de salmuera residual antes y después de la destilación solar Dependiente: Y1: Características fisicoquímicas Y2: Características microbiológicas	Análisis físico Análisis microbiológico	pH Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Salinidad (%) Turbiedad (UNT) Sólidos Disueltos Totales (mg/L) Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L) Demanda química de oxígeno (mg/L) Coliformes fecales (NMP/100 ml) Coliformes totales (NMP/100 ml) Eficiencia de remoción (%)	Método del multiparámetro a lectura directa Método del multiparámetro a lectura directa Método Nefelométrico Método del multiparámetro a lectura directa Método prueba DBO en 5 días Método colorimetría Prueba de confirmación de coliformes fecales Prueba de confirmación de coliformes totales Medición indirecta mediante aplicación de ecuación 3	Análisis descriptivo

Anexo 6

Panel fotográfico

Foto 1

Armado de la cubierta de vidrio



Foto 5

Unión de la cubierta de vidrio



Foto 9

Pegado del sistema de ingreso de agua y termocuplas



Foto 13

Colocación de canales de recolección de agua recuperada

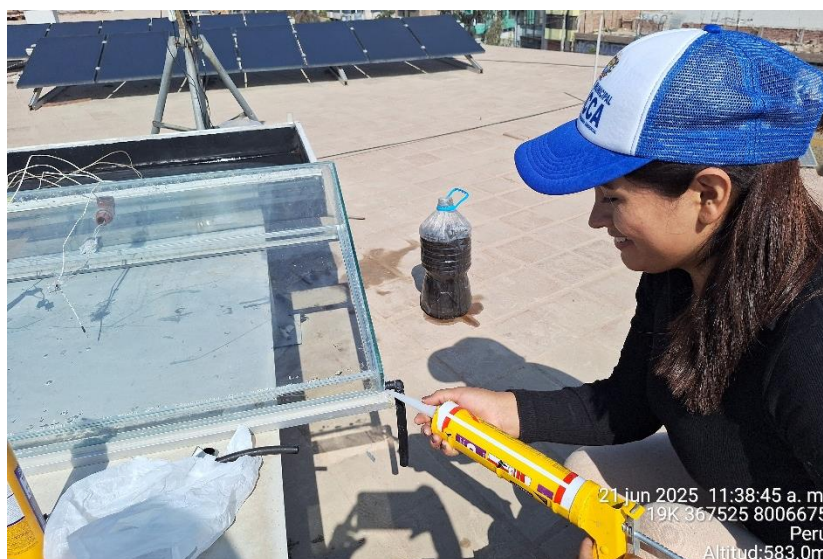


Foto 5

Destilador solar culminado



Foto 6

Colocación de termocuplas en el interior del destilador solar



Foto 7

Instalación y conexión de termocupas y almacenador de datos



Foto 8

Estación meteorológica y destilador solar en funcionamiento



Foto 9

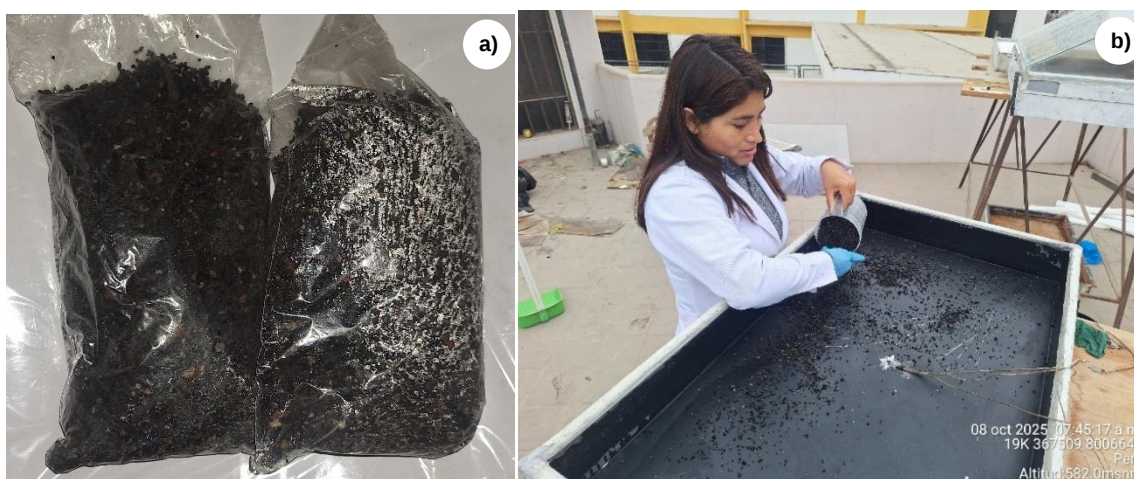
Acumulador de calor: Grava



Nota. a) Material de acumulación de calor: grava, b) Colocación de grava en la cubeta de almacenamiento del destilador solar

Foto 10

Acumulador de calor: Grava volcánica



Nota. a) Material de acumulación de calor: grava volcánica, b) Colocación de grava volcánica en la cubeta de almacenamiento del destilador solar

Foto 11

Adición de salmuera residual de aceituna verde al destilador solar



Foto 12

Agua recuperada obtenida mediante destilación solar



Foto 13

Muestras enviadas para análisis en laboratorio ALAB



Nota. a) Muestra de salmuera residual de aceituna verde, b) Muestra de agua recuperada por destilación solar, y c) Envío de muestras para análisis de DQO, DBO5 y coliformes.

Foto 14

Análisis de parámetros fisicoquímicos antes y después del proceso de destilación solar en laboratorio



Nota. a) Determinación de turbidez, b) Determinación de pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y salinidad, y c) Equipos empleados.

Anexo 14

Informe de análisis de laboratorio



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-47388

N° Id.: 0000188448

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- | | |
|------------------|---|
| 1.- RAZON SOCIAL | : MAMANI ATAJO NELLY MARIBEL |
| 2.- DIRECCIÓN | : Tacna |
| 3.- PROYECTO | : RECUPERACION DE AGUA DE LA SALMUERA RESIDUAL DE ACEITUNA VERDE MEDIANTE UN DESTILADOR SOLAR CON ACUMULADOR DE CALOR |
| 4.- PROCEDENCIA | : CENTRO DE ENERGIA RENOVABLES TACNA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN DE TACNA |
| 5.- SOLICITANTE | : MAMANI ATAJO NELLY MARIBEL |
| 6.- PRODUCTO | : Agua Salina |

II.- DATOS DEL SERVICIO

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1.- ORDEN DE SERVICIO N° | : 0000007015-2025-0001 |
| 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME | : 2025-11-12 |

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- | | |
|----------------------------|---|
| 1.- MUESTREO POR | : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA |
| 2.- NÚMERO DE MUESTRAS | : 2 |
| 3.- FECHA DE RECEPCIÓN | : 2025-10-25 |
| 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN | : En buen estado de conservación y preservación |
| 5.- PERÍODO DE ENSAYO | : 2025-10-25 al 2025-11-12 |


 Mgtr. Ing. U.C. Freddy A. Taipe Castro
 Director de Investigación y Desarrollo
 CIP N° 150812


 Marleni V. Olivera Castromonte
 Supervisor de Laboratorio de
 Microbiología e Hidrobiología
 CBP N° 16639



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos 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.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág. 1 de 3

● SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chacra N° 1871,
 Belén, Tacna
 TAC: (+51) 713 0799 / 713 0636
 CIL: 977 526 675 / 977 512 579

● SEDE ZARUMILLA
 Prolongación Zarumilla No 00 L1 S,
 Belén, Tacna
 CIL: 977 526 675 / 932 649 490

● SEDE AREQUIPA
 COOP SODURU MO S L1 S,
 Arequipa
 TAC: (+51) 818 843
 CIL: 932 649 442

● SEDE PUNTA
 UIC, San Isidro 19 Eje A,
 Mo: 00 L1 S2,
 Cobres - Puno
 TAC: (+51) 713 0636
 CIL: 919 475 133

● SEDE TACNA
 UIC, Sol de Trabajo Mo A L1 S,
 Alto Sarmiento - Tacna
 TAC: (+51) 713 0636
 CIL: 919 475 133

 www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-47388

N° Id.: 0000188448

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Thermotolerant Coliforms and E.coli.	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Coliformes Totales (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique.	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. / Part 4500-O H, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test / Oxygen (dissolved). Optical-Probe Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Demanda Química de Oxígeno (Agua Salina)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 A.2 ; D, 24 th Ed. (Validado - Aplicado fuera del alcance). 2023.	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 CHALACA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-47388

N° Id.: 0000188448

V.- RESULTADOS

ITEM				1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-106438	M-25-106439
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				CERT UNJ86 (MIS)	CERT UNJ86 (Mds6)
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(B)				E:0367509 N:8006647	E:0367510 N:8006647
PRODUCTO ^(B)				Agua Salina	Agua Salina
SUB PRODUCTO ^(B)				Salmuera	Salmuera
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(B)				24-10-2025 09:50	24-10-2025 10:05
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	7,8	<1,8
Coliformes Totales (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	13,0	<1,8
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,8	2,0	5 707,5	1 080,6
Demanda Química de Oxígeno (Agua Salina) (*)	mg/L	4,0	10,0	7 714,3	2 430,3

^(A) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.
L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

^(B) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág.3 de 3

SEDE PRINCIPAL:
Av. Guardia Chelaca N° 1877,
Bellavista, Callao.
Tel.: (+51) 713 0766 / 713 0636
Cel.: 977 516 075 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA:
Prosegucción Zarumilla Mz D2 L13,
Bellavista, Callao.
Cel.: 977 516 075 / 932 646 490

SEDE AREQUIPA:
COOP. SEDOSUR Mz. E L1 9,
AYUDOS
Tel.: (+51) 018 643
Cel.: 932 646 542

SEDE PIURA:
Urb. San Isidro 18 Edapa
Mz. D2 L1 02,
Castillo - Piura
Tel.: (+51) 713 0636
Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO:
Urb. Sol de Trujillo Mz. A L1 29,
Ato Suberczy - Trujillo
Tel.: (+51) 713 0636
Cel.: 919 475 133

www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-50880

N° Id.: 0000191940

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- | | |
|------------------|---|
| 1.- RAZON SOCIAL | : MAMANI ATAJO NELLY MARIBEL |
| 2.- DIRECCIÓN | : Tacna |
| 3.- PROYECTO | : RECUPERACION DE AGUA DE LA SALMUERA RESIDUAL DE ACEITUNA VERDE MEDIANTE UN DESTILADOR SOLAR CON ACUMULADOR DE CALOR |
| 4.- PROCEDENCIA | : CENTRO DE ENERGIA RENOVABLES TACNA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN DE TACNA |
| 5.- SOLICITANTE | : MAMANI ATAJO NELLY MARIBEL |
| 6.- PRODUCTO | : Agua Salina |

II.- DATOS DEL SERVICIO

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1.- ORDEN DE SERVICIO N° | : 0000007015-2025-0001 |
| 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME | : 2025-12-02 |

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- | | |
|----------------------------|---|
| 1.- MUESTREO POR | : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA |
| 2.- NÚMERO DE MUESTRAS | : 1 |
| 3.- FECHA DE RECEPCIÓN | : 2025-11-06 |
| 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN | : En buen estado de conservación y preservación |
| 5.- PERÍODO DE ENSAYO | : 2025-11-06 al 2025-12-02 |


Mgtr. Ing. U.C. Freddy A. Taipe Castro
Director de Investigación y Desarrollo
CIP N° 150812


Marleni V. Rivera Castromonte
Supervisor de Laboratorio de
Microbiología e Hidrobiología
CBP N° 16639



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos 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.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág. 1 de 3

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-50880

N° Id.: 0000191940

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E. coli.	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Demanda Química de Oxígeno (Agua Salina)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 A.2 :D, 24 th Ed. (Validado - Aplicado fuera del alcance). 2023.	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 CHALACA
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. / Part 4500-O H, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test / Oxygen (dissolved). Optical-Probe Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Coliformes Totales (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique.	INACAL LE - 096 AREQUIPA

SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

APHA: American Public Health Association

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-50880

N° Id.: 0000191940

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-114501
CÓDIGO CLIENTE ^(*)				CERT-UNJB6 (Md6)
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(*)				E:0367509 N:8006647
PRODUCTO ^(*)				Agua Salina
SUB PRODUCTO ^(*)				Salmuera
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(*)				05-11-2025 19:40
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	<1,8
Coliformes Totales (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	<1,8
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,8	2,0	<2,0
Demanda Química de Oxígeno (Agua Salina) (*)	mg/L	4,0	10,0	<10,0

^(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

^(*) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág.3 de 3

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chasca N° 3877,
Bolsueta, Callao.
Tel.: (+51) 713 0786 / 713 0636
Cel.: 977 516 679 / 977 111 379

SEDE ZARUMILLA
Protección Zaramilla Mz 02 L13,
Bolsueta, Callao.
Cel.: 977 828 675 / 932 648 490

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz. 6 L1-5,
Arequipa.
Tel.: (+51) 818 643
Cel.: 972 645 942

SEDE PIURA
Urb. San Isidro II Etapa
Mz. 05 L1 02,
Cuzco - Piura
Tel.: (+51) 713 0636
Cel.: 910 475 133

SEDE TUMBILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A.L1 29,
Alto Salaverry - Trujillo
Tel.: (+51) 713 0636
Cel.: 910 475 133

www.alab.com.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-49399

N° Id.: 0000190459

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- | | |
|------------------|---|
| 1.- RAZÓN SOCIAL | : MAMANI ATAJO NELLY MARIBEL |
| 2.- DIRECCIÓN | : Tacna |
| 3.- PROYECTO | : RECUPERACION DE AGUA DE LA SALMUERA RESIDUAL DE ACEITUNA VERDE MEDIANTE UN DESTILADOR SOLAR CON ACUMULADOR DE CALOR |
| 4.- PROCEDENCIA | : CENTRO DE ENERGIA RENOVABLES TACNA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN DE TACNA |
| 5.- SOLICITANTE | : MAMANI ATAJO NELLY MARIBEL |
| 6.- PRODUCTO | : Agua Salina |

II.- DATOS DEL SERVICIO

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1.- ORDEN DE SERVICIO N° | : 0000007015-2025-0001 |
| 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME | : 2025-12-02 |

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- | | |
|----------------------------|---|
| 1.- MUESTREO POR | : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA |
| 2.- NÚMERO DE MUESTRAS | : 1 |
| 3.- FECHA DE RECEPCIÓN | : 2025-11-07 |
| 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN | : En buen estado de conservación y preservación |
| 5.- PERÍODO DE ENSAYO | : 2025-11-07 al 2025-12-02 |


Mgtr. Ing. U.C. Freddy A. Taipe Castro
Director de Investigación y Desarrollo
CIP N° 150812


Marleni V. Rivera Castromonte
Supervisor de Laboratorio de
Microbiología e Hidrobiología
CBP N° 16639



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos 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.

Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág. 1 de 3

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-49399

N° Id.: 0000190459

IV.- MÉTODOS DE ENSAYO

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO	CONDICIÓN DE ACREDITACIÓN / LUGAR DE ANÁLISIS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 F.2, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Escherichia coli Procedure Using Fluorogenic Substrate. Simultaneous Determination of Termotolerant Coliforms and E. coli.	INACAL LE - 096 AREQUIPA
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. / Part 4500-O H, 24th Ed. 2023.	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test / Oxygen (dissolved). Optical-Probe Method	INACAL LE - 096 CHALACA
Demanda Química de Oxígeno (Agua Salina)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 A.2 ; D, 24 th Ed. (Validado - Aplicado fuera del alcance). 2023.	Chemical Oxygen Demand, Closed Reflux, Colorimetric Method.	INACAL LE - 096 CHALACA
Coliformes Totales (NMP)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 B, 24th Ed. 2023.	Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group. Standard Total Coliform Fermentation Technique.	INACAL LE - 096 AREQUIPA

"SMEWW" : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

"APHA" : American Public Health Association

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-49399

N° Id.: 0000190459

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-25-111118
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				CERT UNJ86 (Mad)
COORDENADAS - UTM WGS 84 ^(A)				E:0367504 N:8006647
PRODUCTO ^(A)				Agua Salina
SUB PRODUCTO ^(A)				Salmuera
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				06-11-2025 10:33
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Coliformes Fecales (Termotolerantes) (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	<1,8
Coliformes Totales (NMP) (*)	NMP/100mL	NA	1,8	<1,8
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,8	2,0	1 167,5
Demanda Química de Oxígeno (Agua Salina) (*)	mg/L	4,0	10,0	2 452,7

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

(A) Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág.3 de 3

 SEDE PRINCIPAL
 Av. Guardia Chaska N° 3877,
 Belén, Cusco
 Tel.: (+51) 713 0758 / 713 0636
 Cel.: 977 558 675 / 937 113 379

 SEDE ZARUMILLA
 Privilegiado Zarumilla M2 C0 L1 3,
 Belén, Cusco
 Cel.: 977 558 675 / 932 648 490

 SEDE AREQUIPA
 COOP. RESUR. M2. E. L1. 9,
 Arequipa
 Tel.: (+51) 818 843
 Cel.: 932 648 942

 SEDE PUURA
 Urb. San Isidro II Etapa,
 Mz. 05 L1 02,
 Casilla - Puno
 Tel.: (+51) 713 0636
 Cel.: 919 475 333

 SEDE TILLO
 Urb. 9da de Trujillo M2. A L1. 29,
 Alto Salaverry - Trujillo
 Tel.: (+51) 713 0636
 Cel.: 919 475 333

www.alab.com.pe