

EVALUACIÓN DEL DESTILADOR SOLAR PARA LA RECUPERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL ECOLÓGICO
EVALUATION OF THE SOLAR DISTILLER FOR THE RECOVERY OF WASTEWATER IN THE PRODUCTION OF ECOLOGICAL PAPER

Autor: ¹Yamile Sumi Manchaco Cerron.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-7442-5843>

¹E-mail de contacto: smanchacoc@unjbg.edu.pe

Afiliación: ¹*Universidad Nacional Jorge Basadre de Tacna, (Perú).

Artículo recibido: 3 de julio del 2025

Artículo revisado: 5 de julio del año

Artículo aprobado: 15 de julio del 2025

¹ Estudiante de la carrera profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Jorge Basadre de Tacna, (Perú).

Resumen

El objetivo del trabajo presentado fue evaluar el destilador solar para la recuperación de aguas residuales en la producción de papel ecológico en Tacna, la cual se usó un destilador solar de dos vertientes donde se evaluaron el volumen inicial y final después de pasar por el destilador solar, asimismo se analizó los parámetros fisicoquímicos del agua residual gris antes y después del tratamiento (pH, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, turbidez) y se evaluó el agua mediante el método de índice de germinación. Se obtuvo un volumen inicial de 26 litros, después de un periodo de 10 días se recolectó 20,338 de agua destilada teniendo un rendimiento del 78,185 % como parámetros fisicoquímicos finales se obtuvo un pH de 8.19, conductividad eléctrica de 9.52 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólidos totales disueltos de 16.28 mg/L y turbidez de 0.914 NTU, dentro del índice de germinación el T₂ (Agua después del destilador solar) germinaron un 90 % del total de semillas sembradas. Concluyendo que la evaluación del destilador solar para la recuperación de aguas residuales en la producción de papel ecológico presenta una alternativa viable para la recuperación de agua grises, teniendo un impacto positivo tanto social, económico y ambiental y optimizando el uso de agua en la industria papelería.

Palabras clave: Agua grises, Destilador solar, Volumen, Parámetros fisicoquímicos, Índice de germinación.

Abstract

The objective of the presented work was to evaluate the solar distiller for the recovery of

wastewater in the production of ecological paper in Tacna, which used a two-slope solar distiller where the initial and final volume were evaluated after passing through the solar distiller, also the physicochemical parameters of the gray wastewater were analyzed before and after treatment (pH, total dissolved solids, electrical conductivity, turbidity) and the water was evaluated using the germination index method. An initial volume of 26 liters was obtained, after a period of 10 days, 20,338 of distilled water was collected with a yield of 78.185% as final physicochemical parameters a pH of 8.19, electrical conductivity of 9.52 $\mu\text{S} / \text{cm}$, total dissolved solids of 16.28 mg / L and turbidity of 0.914 NTU were obtained, within the germination index T₂ (Water after the solar distiller) 90% of the total seeds planted germinated. Concluding that the evaluation of the solar distiller for the recovery of wastewater in the production of ecological paper presents a viable alternative for the recovery of gray water, having a positive impact both socially, economically and environmentally and optimizing the use of water in the paper industry.

Keywords: Grey water, Solar still, Volume, Physicochemical parameters, Germination index.

Sumário

O objetivo do trabalho apresentado foi avaliar o destilador solar para recuperação de águas residuais na produção de papel ecológico em Tacna, que utilizou um destilador solar de duas vertentes onde foram avaliados o volume inicial e final após a passagem pelo destilador solar, também foram analisados os parâmetros

físico-químicos das águas residuais cinzas antes e depois do tratamento (pH, sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica, turbidez) e a água foi avaliada pelo método do índice de germinação. Foi obtido um volume inicial de 26 litros, após um período de 10 dias, foram coletadas 20.338 de água destilada com um rendimento de 78,185% como parâmetros físico-químicos finais foram obtidos um pH de 8,19, condutividade elétrica de 9,52 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sólidos dissolvidos totais de 16,28 mg/L e turbidez de 0,914 NTU, dentro do índice de germinação T2 (Água após o destilador solar) 90% do total de sementes plantadas germinaram. Concluindo que a avaliação do destilador solar para recuperação de águas residuárias na produção de papel ecológico apresenta uma alternativa viável para recuperação de águas cinzas, impactando positivamente tanto social, econômica e ambientalmente e otimizando o uso da água na indústria papelreira.

Palavras-chave: Água cinza, Destilador solar, Volume, Parâmetros físico-químicos, Índice de germinação

Introducción

La creciente preocupación por el impacto ambiental de las industrias ha impulsado la búsqueda de tecnologías más sostenibles, especialmente en sectores con alta demanda de agua, como la producción de papel. La industria del papel ha sido señalada como una de las principales consumidoras de agua a nivel global, y la gestión de sus aguas residuales es fundamental para mitigar su impacto ambiental (Corrales y Vera, 2022) En particular, el tratamiento y recuperación de aguas residuales es un desafío significativo para la industria del papel, la cual consume grandes volúmenes de agua en sus procesos (Singh et al., 2023). Las aguas residuales generadas en estas actividades contienen una variedad de contaminantes que, si no se tratan adecuadamente, pueden afectar gravemente al medio ambiente y la salud pública (Castillo et al., 2021). La ciudad de

Tacna, ubicada en una zona desértica del sur de Perú, enfrenta retos adicionales relacionados con la escasez de agua, lo que hace aún más relevante el uso de tecnologías sostenibles para la recuperación de recursos hídricos (Pino, 2021). La producción de papel ecológico, que busca minimizar el uso de productos químicos y maximizar la reutilización de materiales, se ha convertido en una opción favorable para reducir el impacto ambiental de esta industria contribuyendo al cumplimiento de normativas ambientales más estrictas (Urresta et al., 2022).

Una de las tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales es la destilación solar, la cual ha demostrado ser eficaz en la purificación del agua mediante el aprovechamiento de la energía solar (Tabuada, 2015). El destilador solar es una alternativa de bajo costo, eficaz y amigable con el ambiente a diferencia de otros destiladores convencionales (Córdova et al., 2023). Este método de purificación consta de dos etapas la evaporación y condensación, que eliminan sustancias indeseables tales como minerales y microorganismos obteniendo agua destilada (Alwan et al., 2024) asimismo el reaprovechamiento de la energía solar es una opción óptima para la generación de agua en regiones áridas, debido a que no requiere consumo energético y una demanda de inversión mínima (Chiroque, 2018). La presente investigación tiene como objetivo principal evaluar el destilador solar para la recuperación de aguas residuales en la producción de papel ecológico y como objetivos específicos analizar las características físicoquímicas del agua residual antes y después del proceso de destilación solar y evaluar el volumen de agua destilada recuperada y su efecto sobre el índice de germinación.

Materiales y Métodos

La destilación del agua tratada mediante un destilador solar de dos vertientes se realizó en el Centro de Energías Renovables Tacna (CERT) así mismo el agua residual fue obtenida mediante la elaboración de papeles ecológicos obtenidos en el Centro de Investigación de Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann en la provincia de Tacna, Perú. En la recuperación de los efluentes se usó la técnica de destilación para la separación de estas sustancias volátiles mediante un destilador solar de dos vertientes (Sabando, 2017), posee un aislante térmico de poliestireno en la base y tiene 2 canaletas del condensador en sus extremos, esto permite la entrada del efluente y la salida del agua obtenida, lo cual será depositada en bidones, para su posterior almacenamiento (Cutipa, 2023)

La destilación solar se realizó en condiciones ambientales mediante la metodología de Pérez y Salazar (2015) la cual se predominaba altas temperaturas y una radiación solar mayor, en un periodo de 10 días, evaluando cada dos días la cantidad de salida de agua destilada del destilador solar. En las muestras se evaluaron el agua antes y después del proceso de destilación por el método de Córdova et al. (2023) determinado los parámetros fisicoquímicos tales como de turbidez (NTU), pH, sólidos totales disueltos (mg/l), conductividad eléctrica (us/cm) y temperatura (°C). Para la determinación de índice de germinación se aplicó la metodología de Aguilar (2020), donde como prueba preliminar se realizó el índice de germinación para tres tipos de agua (agua potable, agua residual de la elaboración del papel ecológico, agua destilada), donde se usaron 15 semillas de rábano (*Raphanus Sativus*) y se colocaron en la placa Petri.

Posteriormente se colocó y mojó papel filtro con 5 mL de cada tipo de agua usando una pipeta, permaneciendo a una temperatura ambiente por un periodo de 5 días hasta cumplir su etapa de germinación. Para la medición de las radículas se utilizó un instrumento milimetrado. Finalmente, el cálculo del índice de germinación (IG) se siguió la metodología dada por Florez (2017), donde se expresó el porcentaje de la germinación relativa de semillas (GRS), el crecimiento relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG) mediante las siguientes ecuaciones: $GRS (\%) = (\text{Número de semillas germinadas con la muestra de agua problema} / \text{Número de semillas germinadas}) \times 100$. $CRR (\%) = (\text{Longitud promedio de la radícula con la muestra de agua problema} / \text{Longitud promedio de la radícula con agua destilada}) \times 100$. $IG (\%) = (GRS * CRR) / 100$.

Resultados y Discusión

Analizar las características fisicoquímicas del agua residual antes y después del proceso de destilación solar

Tabla 1. *Parámetros fisicoquímicos antes y después del proceso del destilador solar*

Parámetro	Agua gris	Agua destilada
pH	7.93	8.19
Conductividad eléctrica	1106 us/ cm	952 us/cm
Sólidos totales disueltos	552 mg/l	13.04 mg/l
Turbidez	541.28 UNT	0.914 UNT

Fuente: Elaboración propia

Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos de la muestra de agua proveniente del proceso de elaboración de papel ecológico antes y después de pasar por el destilador solar de dos vertientes las cuales fueron pH, conductividad eléctrica, Sólidos totales disueltos y turbidez. En la Tabla 1 se muestra los resultados obtenidos donde se presentó un pH de 7.93 a 8.19, está ligeramente por encima de la neutralidad, indicando que el

agua es ligeramente alcalina. una conductividad eléctrica de 1106 a 9.52 us/cm lo que refleja la cantidad de sales solubles o compuestos iónicos disueltos. Sólidos Totales Disueltos 552 a 13.04 mg/l, finalmente obteniendo una turbidez de 541. 28 lo que sugiere una alta concentración de partículas suspendidas en el agua. pasando a 0.914 UNT resaltando una alta disminución de este parámetro,

Evaluar el volumen de agua destilada recuperada y su efecto sobre el índice de germinación.

Los datos obtenidos del SENAMHI se recopilaron a través de la estación meteorológica Jorge Basadre, la cual es la más cercana a la ubicación del destilador solar. Esta estación, clasificada como MAP-Meteorológica, proporcionó la información necesaria para el análisis. Sin embargo, se observaron ciertas variaciones climáticas en los días 23 y 24 de noviembre del 2024, donde se registraron precipitaciones de 0.9 mm/día y 0.2 mm/día, respectivamente. Estas condiciones influyeron en el tiempo y la eficiencia del proceso de destilación. En la Figura 1 se muestra que durante el período del 20 al 30 de noviembre oscilan entre 25°C y 15°C, lo cual indica condiciones climáticas favorables para la operación de un destilador solar en la recuperación de aguas residuales para la producción de papel ecológico.

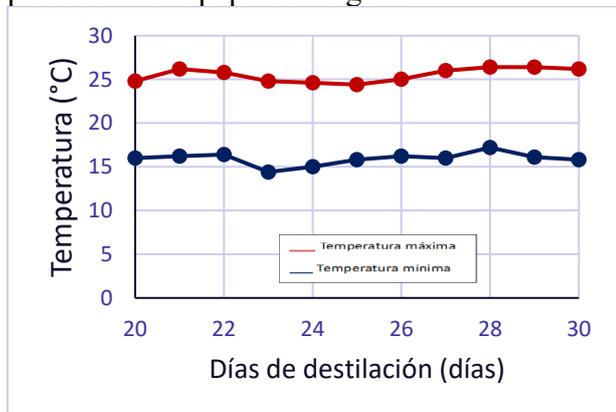


Figura 1. Datos de temperatura máximo y mínimo de Tacna durante los días de destilación

En la Figura 2 se muestra que durante el período del 20 al 30 de noviembre oscila entre 70% y 80%, lo cual indica condiciones favorables para la operación de un destilador solar en la recuperación de aguas residuales para la producción de papel ecológico.



Figura 2. Datos de la humedad relativa (%) en la ciudad de Tacna durante los días de destilación

El proceso de destilación se inició el 20 de noviembre de 2024, registrándose mediciones de la cantidad de agua destilada producida en un período de 24 horas donde se inició con un total de 26 litros El 26 de noviembre se registró un total de 9.698 l de agua destilada y el 29 de octubre 5.18 l. En la Figura 3 se observa que mediante la transpiración del agua en el destilador se obtiene agua destilada de los residuos de papel artesanal.



Figura 3: Resultado del destilador solar de dos vertientes

Después de los 10 días se obtuvo un total de 20.328 litros de agua destilada. Para determinar la cantidad de agua recuperada se emplea la fórmula de rendimiento basándonos en la

cantidad inicial de aguas grises y el resultado final obtenido de la destilación.

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Volumen recuperado}}{\text{Volumen inicial}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{20.328}{26} \times 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = 78.185$$

Índice de germinación empleando semillas de rabanito

En la Tabla 2 se observaron las diferentes repeticiones presentes para la evaluación del índice de germinación y el efecto de diferentes tipos de agua para la germinación del rabanito.

Tabla 2. *Parámetros fisicoquímicos antes y después del proceso*

Tipo de agua	Repeticiones	Semillas sembradas	Semillas germinadas
T ₀	R ₁	15	8
T ₁	R ₁	15	9
	R ₂	15	10
T ₂	R ₁	15	9
	R ₂	15	10

Nota: Agua destilada de laboratorio (T₀), Agua potable (T₁), Agua después del destilador solar (T₃)

Conclusiones

La evaluación del destilador solar para la recuperación de aguas residuales en la producción de papel ecológico presenta una alternativa viable para la recuperación de agua grises. Este método no solo es económico, sino que también tiene un bajo impacto ambiental. La destilación solar utiliza la energía del sol para evaporar el agua, dejando atrás los contaminantes, lo que la convierte en una opción atractiva para la recuperación de aguas residuales. El análisis inicial del agua residual del proceso de elaboración de papel ecológico mostró valores elevados de pH 7.93, conductividad eléctrica 1106 µS/cm, sólidos totales disueltos 552 mg/L y turbidez 541.28 NTU, indicando una alta carga de

contaminantes, después del tratamiento con destilación solar, el agua recuperada presentó mejoras significativas en sus características físico-químicas, con un pH de 8.19, conductividad eléctrica de 9.52 µS/cm, sólidos totales disueltos de 16.28 mg/L y turbidez de 0.914 NTU. Las condiciones climáticas fueron favorables en Tacna, con temperaturas entre 15°C y 26°C y humedad relativa entre 70% y 80%, contribuyeron a la eficiencia del proceso de destilación solar. El proceso de destilación solar realizado durante 10 días permitió recuperar un total de 20.328 litros de agua, lo que representa un rendimiento del 78.185% respecto al volumen inicial de 26 litros de agua residual. El índice de germinación de las semillas de rábano utilizando el agua destilada fue del 100%, en comparación con el 90% obtenido con el agua residual sin tratar, lo que indica una mejora en la calidad del agua para su posible reutilización.

Referencias Bibliográficas

- Alwan, N., Mahmood, A., Alomar, O., Abdulrazzaq, N., Majeed, O., & Abed, R. (2024). Rendimiento de los destiladores solares y técnicas de mejora: una investigación de revisión. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024137243>
- Castillo S. Torres, M., Guerra, R., Torres, I. (2021). La formación ambiental de la Licenciatura en Educación Química Industrial, papel de la asignatura Tecnología ambiental. <https://maestrosociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/5443/5139>
- Chiroque, R. (2018). Comparación de destiladores solares para la obtención de agua dulce en pozos de agua salobre en la Comunidad Campesina San Juan Bautista de Catacaos – Piura. Aporte Santiaguino. https://revistas.unasam.edu.pe/index.php/Aporte_Santiaguino/article/view/581/688
- 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 de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias*.
<https://revistaalfa.org/index.php/revistaalfa/article/view/290/748>
- Corrales, S., Vera, J. (2021). Industrialización del agua y producción de cerveza en Monterrey. *Revista Inyersticios sociales*.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-49642022000100317&script=sci_arttext
- Cutipa, J. (2023). *Diseño, construcción y análisis de destilador solar de doble vertiente acoplado a colector solar de placa plana, como alternativa de obtención de agua pura a base de energía renovable, aplicado a la población rural del distrito de Majes* [Tesis profesional, Universidad Católica de Santa María].
<https://repositorio.ucsm.edu.pe/bitstreams/f62ceb61-03a3-4763-bb5f-3dd3ad73bbbd/download>
- Florez, M. (2017). *Elaboración de biofertilizante líquido utilizando subproductos del procesamiento de trucha (Oncorhynchus mykiss)* [Tesis profesional, Universidad Nacional Agraria La Molina].
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/2d4e43e3-ba0c-4ff3-af23-9cf11770a5f0/content>
- Pérez, J., y Salazar, R. (2015). Análisis del comportamiento de un prototipo de destilador solar en la ciudad de Cartagena.
<https://repositorio.unicartagena.edu.co/server/api/core/bitstreams/3e6b5c4a-5405-4b12-81a7-97ada7df448c/content>
- Pino, E. (2021). Conflictos por el uso del agua en una región árida: caso Tacna, Perú. *Revista Dialogo Andino*.
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0719-26812021000200405&script=sci_arttext
- Sabando, A. (2017). *Diseño y construcción de un destilador solar para aguas residuales en la ciudad de Riobamba* [Tesis de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, ESPOCH].
<https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/884115d5-1dfd-406b-8fc4-e459c22d342d/content>
- Singh, B., Chakraborty, A., Sehgal, R. (2023). Una revisión sistemática de la gestión de aguas residuales industriales: evaluación de desafíos y facilitadores. *Revista Science Direct*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723020182>
- Tabuada, B. (2015). *Diseño y construcción de un destilador solar para agua de una capacidad de 200 ml/día para los laboratorios del Civabi*.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8615/7/UPS%20-%20ST004867.pdf>
- Urresta, E., Moya, M., Campana, A., Rodríguez, D. (2022). Desalinizador solar de múltiples etapas para su aplicación en zonas costeras del Ecuador.
<https://www.redalyc.org/journal/5722/572269616001/html/>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Yamile Sumi Manchaco Cerron.

