

ORIGINAL

Design and implementation of an IoT monitoring system for the optimization of solar stills for water desalination

Diseño e implementación de un sistema de monitoreo IoT para la optimización de destiladores solares en la desalinización de agua

Roger David Pimienta Barros¹ 

¹Universidad de La Guajira. Colombia.

Citar como: Pimienta Barros RD. Design and implementation of an IoT monitoring system for the optimization of solar stills for water desalination. LatIA. 2024; 2:101. <https://doi.org/10.62486/latia2024101>

Recibido: 01-02-2024

Revisado: 06-05-2024

Aceptado: 15-08-2024

Publicado: 16-08-2024

Editor: Prof. Dr. Javier González Argote 

ABSTRACT

The project “Design and Implementation of an IoT Monitoring System for the Optimization of Solar Distillers in Water Desalination” sought to improve the efficiency of desalination in La Guajira, a region with critical water scarcity. The objective was to develop an IoT system to optimize solar stills, offering a sustainable solution. A prototype solar still with IoT monitoring was built. The study included the creation of circuits to integrate sensors and an HTML dashboard to visualize real-time variables, such as internal and external temperatures, humidity, and water level in the basin, facilitating the calculation of efficiency. The IoT monitoring system proved to be effective in increasing efficiency and providing valuable data for design decisions, marking a step towards water autonomy.

Keywords: Solar Desalination; Internet of Things (IoT); Solar Still Efficiency; Remote Monitoring.

RESUMEN

El proyecto “Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo IoT para la Optimización de Destiladores Solares en la Desalinización de Agua” buscó mejorar la eficiencia de la desalinización en La Guajira, una región con escasez crítica de agua. El objetivo fue desarrollar un sistema IoT para optimizar destiladores solares, ofreciendo una solución sustentable. Se construyó un prototipo de destilador solar con monitoreo IoT. El estudio incluyó la creación de circuitos para integrar sensores y un dashboard en HTML para visualizar variables en tiempo real, como temperaturas interna y externa, humedad, y nivel de agua en la cuenca, facilitando el cálculo de eficiencia. El sistema de monitoreo IoT demostró ser efectivo para aumentar la eficiencia y proporcionando datos valiosos para decisiones de diseño, marcando un avance hacia la autonomía hídrica.

Palabras clave: Desalinización Solar; Internet de las Cosas (IoT); Eficiencia en Destiladores Solares; Monitorización Remota.

INTRODUCCIÓN

En el Departamento de La Guajira, la escasez crítica de agua potable constituye un desafío de gran envergadura, exacerbado por condiciones climáticas adversas y limitaciones en la infraestructura hídrica. En respuesta a esta situación, el proyecto “Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo IoT para la Optimización de Destiladores Solares en la Desalinización de Agua” se propuso monitorizar las principales variables de los procesos de desalinización solar a través de la tecnología del Internet de las Cosas (IoT), como punto de partida para la obtención de soluciones más eficientes. Este enfoque busca no solo aumentar la disponibilidad de agua potable sino también garantizar la sostenibilidad y escalabilidad de las soluciones futuras.

La desalinización solar, aprovechando la abundante radiación solar en La Guajira, se presenta como una estrategia viable para abordar la crisis hídrica. No obstante, los métodos tradicionales han enfrentado limitaciones significativas en términos de eficiencia y adaptabilidad. El uso de sistemas basados en IoT para el monitoreo y control de destiladores solares introduce una capacidad sin precedentes para optimizar en tiempo real las condiciones operativas, ajustando los procesos según las variaciones ambientales y las necesidades específicas de la región (Benghanem et al., 2021; Gil et al., 2019).

Para abordar estos retos, se diseñó y evaluó experimentalmente un prototipo de destilador solar equipado con un sistema de monitoreo IoT. Este sistema se configuró para registrar múltiples variables críticas, como las temperaturas interna y externa del destilador, la humedad y el nivel de agua, cuyas fluctuaciones impactan directamente en la eficiencia del proceso de desalinización (Alshehri et al., 2021; Muñoz et al., 2020). La integración de sensores específicos y la creación de circuitos esquemáticos adaptados para este fin fueron cruciales para el éxito del proyecto. Además, se desarrolló una interfaz de usuario amigable, un dashboard programado en HTML, que permite la visualización en tiempo real de todas las métricas relevantes. Esta herramienta no solo facilita el monitoreo constante sino que también provee datos valiosos para la toma de decisiones y la mejora continua del sistema, asegurando que cada ajuste contribuya efectivamente a la optimización de la producción de agua desalinizada.

Los resultados obtenidos han demostrado que la implementación de tecnologías IoT puede significativamente incrementar la eficiencia de los destiladores solares. Este avance no solo es un testimonio del potencial de la tecnología IoT en aplicaciones de ingeniería ambiental, sino que también representa un paso esencial hacia la autosuficiencia y la sustentabilidad en la gestión del agua en La Guajira, marcando un camino hacia soluciones innovadoras y duraderas en el contexto de la crisis global de agua.

Este estudio proporciona un marco de referencia para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la desalinización solar, destacando la importancia de la integración de nuevas tecnologías para enfrentar los retos ambientales y sociales de nuestra era. A través de la exploración detallada de las posibilidades que ofrece el IoT, este trabajo contribuye a redefinir las estrategias de gestión del agua en regiones áridas, apuntando hacia una mayor eficiencia operativa y un impacto ambiental reducido.

MÉTODO

El desarrollo de sistemas de monitoreo IoT para la optimización de destiladores solares requiere una metodología rigurosa que integre diseño experimental, ingeniería de sistemas, y análisis de datos. Este enfoque multidisciplinario es esencial para asegurar la precisión, relevancia y aplicabilidad de los hallazgos, especialmente en contextos de escasez de agua como en La Guajira, donde la tecnología de destilación solar representa una solución vital.

Diseño Experimental

La metodología adoptada para este estudio se inició con la selección de un diseño de destilador solar basado en los criterios de eficiencia, simplicidad y coste-efectividad. Esta selección fue informada por estudios previos que demostraron la aplicabilidad de tales sistemas en regiones similares (Benghanem et al., 2022; Bisaga et al., 2017). El diseño experimental se orientó en el desarrollo de un prototipo funcional que permitiese la incorporación y prueba de diferentes configuraciones y componentes de monitoreo.

Construcción del Prototipo

Siguiendo la lógica de diseño propuesta, se procedió a la construcción de un prototipo de destilador. El material predominante fue el vidrio, debido a sus propiedades de transmisión y captación de calor solar, esencial para la eficiencia del proceso de destilación (Burbano, 2014). La base y la estructura de soporte fueron fabricadas con materiales resistentes a la corrosión y al ambiente salino, características relevantes para la durabilidad del sistema en La Guajira.

Integración de IoT

El núcleo del sistema de monitoreo fue un microcontrolador ESP32, seleccionado por su robustez, flexibilidad y compatibilidad con diversos tipos de sensores. Esta elección se apoyó en referencias de estudios similares donde el ESP32 se ha empleado exitosamente en aplicaciones IoT (Alshehri et al., 2021). Se integraron sensores para medir parámetros críticos, como la temperatura ambiente e interna, la humedad y el nivel del agua. Estos sensores se eligieron basados en su precisión y estabilidad, fundamentales para la monitorización de procesos críticos (Benghanem et al., 2021; Bisaga et al., 2017). Los datos capturados por los sensores fueron recogidos y transmitidos a través del ESP32, configurado para operar como un nodo dentro de una red IoT. La infraestructura de red se diseñó para garantizar la transmisión ininterrumpida y segura de datos, aspecto crítico para el monitoreo en tiempo real.

Desarrollo de la Interfaz de Usuario

La interfaz de usuario fue programada en HTML, complementada con JavaScript y hojas de estilo CSS, permitiendo una visualización clara y accesible de los datos recogidos. Este dashboard se desarrolló teniendo en cuenta la usabilidad y la interpretación intuitiva de los datos, permitiendo a los usuarios no especializados comprender y responder a las lecturas de los sensores en tiempo real.

Evaluación de la Eficiencia

La eficiencia del proceso de destilación se evaluó cuantitativamente mediante la comparación del volumen de agua desalinizada frente al volumen de agua evaporada. La formulación matemática para esta evaluación fue adoptada de literatura relevante, la cual proporciona un estándar para la evaluación de la eficiencia en sistemas de destilación (Benghanem et al., 2021d; Daud et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información recopilada a través de un sistema de monitoreo IoT para optimizar destiladores solares en la desalinización del agua, brinda una oportunidad valiosa para analizar las mejoras potenciales en la eficiencia y el diseño de estos sistemas, especialmente en regiones con escasez de agua como el Departamento de La Guajira. Como primeras pruebas se implementaron dos configuraciones distintas del proceso de destilación solar: una utilizando un lente de Fresnel y la otra sin él. Las métricas de eficiencia, calculadas a partir del volumen de agua salada inicial, el agua destilada obtenida y la pérdida por evaporación, son indicadores cruciales de rendimiento. En el caso del destilador equipado con el lente de Fresnel, la eficiencia alcanzó el 60 %, mientras que el destilador sin lente registró una eficiencia del 28,27 %, un dato dentro del rango de los destiladores solares convencionales (Abdenacer & Nafila, 2007; Essa et al., 2022; Sivakumar & Ganapathy Sundaram, 2013). Estos resultados una notable mejoría a partir del uso de los elementos de concentración solar (Chakravarthy et al., 2022; Dellicompagni & Franco, 2019; Elashmawy, 2017; Sales, 2016; Singh & Tiwari, 2017b, 2017a), corroborando hallazgos similares en la literatura. La incorporación de tecnologías IoT permite un control más fino y una toma de decisiones basada en datos, lo que puede conducir a optimizaciones iterativas en el diseño de destiladores solares (Khechekhouche et al., 2021; Meukam et al., 2004; Yousefi et al., 2021).

Tabla 1. Prueba de destilador solar con aplicación de lente Fresnel

Hora	Agua Salada (ml)	Agua Destilada (ml)	Agua Perdida por evaporación (ml)
Inicio (9:51am)	1 000	0	0
Final (5:30pm)	500	300	200

$$\text{Eficiencia } (\eta) = \left(\frac{\text{Agua destilada producida}}{\text{Agua evaporada}} \right) \times 100\%$$

Para nuestro caso:

$$\eta = \left(\frac{300\text{ml}}{500\text{ml}} \right) \times 100\% = 60\%$$

Tabla 2. Prueba de destilador solar sin aplicación de lente Fresnel

Hora	Agua Salada (ml)	Agua Destilada (ml)	Agua Evaporada Perdida por evaporación (ml)
Inicio (10:00am)	1 000	0	0
Final (5:30pm)	855	41	104

$$\text{Eficiencia } (\eta) = \left(\frac{\text{Agua destilada producida}}{\text{Agua evaporada}} \right) \times 100\%$$

Para nuestro caso:

$$\eta = \left(\frac{41\text{ml}}{154\text{ml}} \right) \times 100\% = 28.27\%$$

El código HTML y JavaScript utilizado para el dashboard proporcionó una interfaz sencilla y funcional para la visualización de datos, lo cual es esencial para el seguimiento a distancia y la gestión efectiva del rendimiento del sistema. Esta funcionalidad es consistente con las tendencias actuales en la administración de recursos hídricos y la automatización en la agricultura (Paul, Agnihotri, Kavya, & Tripathi Prachi and Babu, 2022b; Sandhu et al., 2021a).



Figura 1. Primera versión de destilador utilizando lente Fresnel

Finalmente, cabe discutir las implicaciones a largo plazo de estos hallazgos. La capacidad para monitorear y optimizar los destiladores solares a través del IoT no solo tiene el potencial de mejorar la eficiencia del proceso de desalinización, sino también de contribuir a soluciones sustentables a los desafíos hídricos en áreas vulnerables. Estos avances, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, subrayan la importancia de integrar la tecnología en la gestión del agua para mejorar la calidad de vida y la resiliencia ambiental en comunidades desfavorecidas (Naciones Unidas, 2017).

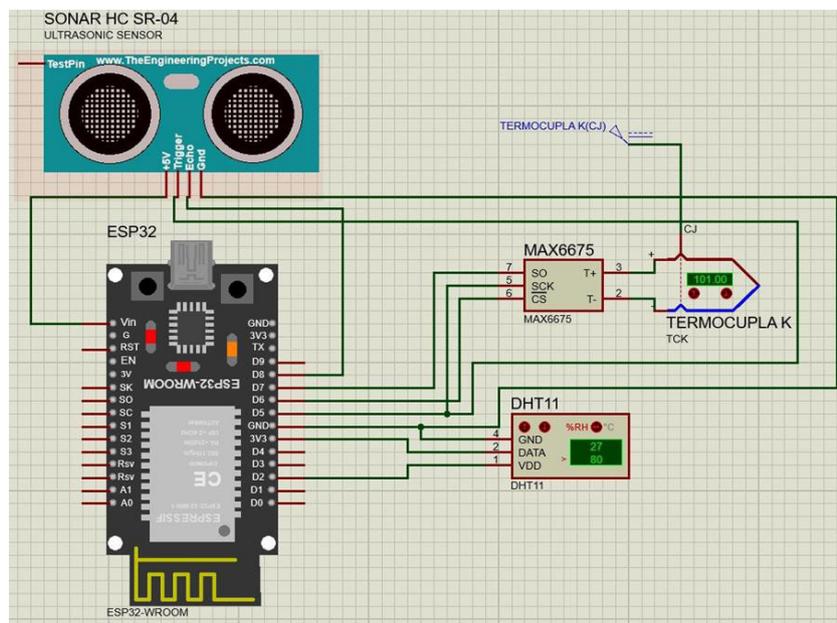


Figura 2. Circuito esquemático del sistema de monitoreo IoT basado en el procesador ESP32

Las futuras investigaciones deberán centrarse en la adaptación y escalabilidad de estos sistemas en diferentes entornos, así como en la mejora continua de la eficiencia y la reducción de costos, lo que podría amplificar significativamente el impacto de estas tecnologías en el mundo real.

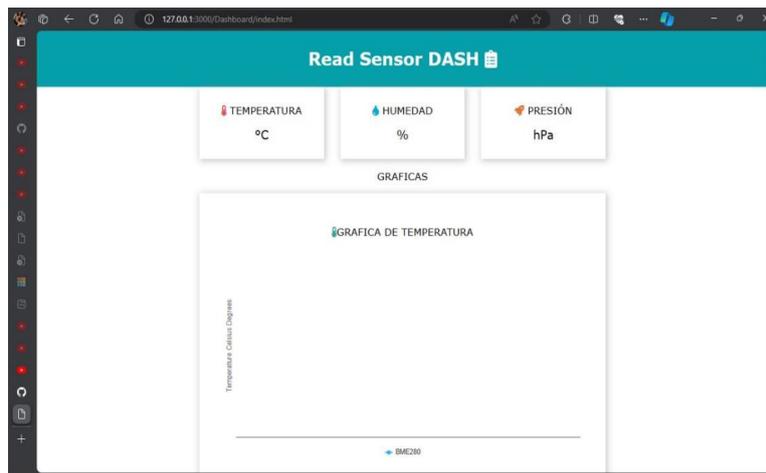


Figura 3. Dashboard diseñado en código HTML con un servidor en la nube, para la visualización de datos en tiempo real



Figura 4. Diseño final del sistema de monitoreo del destilador solar a través de IoT



Figura 5. Datos de monitoreo en tiempo real del ESP 32

CONCLUSIONES

En la conclusión de este proyecto titulado “Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo IoT para la Optimización de Destiladores Solares en la Desalinización de Agua”, cabe destacar como logro principal la significativa mejora en la eficiencia de los destiladores solares, alcanzando un valor de eficiencia del 60 % mediante la integración de un lente de Fresnel. Este resultado representa un avance considerable en comparación con la eficiencia del 28,27 % obtenida por los sistemas sin lente. La relevancia de este incremento radica no solo en la optimización del proceso de desalinización sino también en el potencial de replicabilidad del sistema para otras regiones con similares desafíos hídricos.

La adopción del Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo y análisis de datos ha demostrado ser un componente

tecnológico transformador, posibilitando ajustes en tiempo real y la toma de decisiones basada en información precisa. Esta capacidad de monitoreo remoto e inteligente de los destiladores contribuye directamente a la escalabilidad del sistema y su adaptabilidad a diferentes escenarios, lo que evidencia la flexibilidad y viabilidad del proyecto en distintos contextos geográficos. Desde una perspectiva socioeconómica, el proyecto trasciende los aspectos técnicos, incidiendo positivamente en las comunidades del Departamento de La Guajira. Al facilitar el acceso a agua potable mediante una solución sostenible, se genera un impacto benéfico en la salud pública y en el bienestar socioeconómico, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

El trabajo actual sienta precedentes importantes para la investigación futura, donde se pueden explorar diversas configuraciones y tecnologías de concentración solar para potenciar la eficiencia y reducir los costes asociados a la desalinización. Con ello, se abre un horizonte prometedor para la aplicación de estas tecnologías en la mitigación de la crisis global de agua, proponiendo una metodología efectiva, económicamente accesible y tecnológicamente avanzada.

Finalmente, la combinación de destiladores solares con tecnología IoT emerge como una solución prometedora y sostenible para la problemática del agua, demostrando la capacidad de innovación y aplicación práctica del conocimiento científico y técnico en la resolución de desafíos ambientales críticos, y marcando un camino hacia la autonomía y la gestión inteligente de los recursos hídricos en comunidades vulnerables.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia, programa Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías, y su Programa de Becas de Excelencia Doctoral del Bicentenario, definido en el artículo 45 de la Ley 1942 de 2018, Colombia. (Programa de Becas del Bicentenario), proyecto: “Formación de capital humano de alto nivel pontificia universidad javeriana sede central nacional”, BPIN 2019000100028 (Roger David Pimienta Barros). Agradecimientos eternos a la Universidad de La Guajira.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdenacer, Pr. K., & Nafila, S. (2007). Impact of temperature difference (water-solar collector) on solar-still global efficiency. *Desalination*, 209(1-3 SPEC. ISS.), 298-305. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.043>
2. Alshehri, M., Bhardwaj, A., Kumar, M., Mishra, S., & Gyani, J. (2021). Cloud and IoT based smart architecture for desalination water treatment. *Environmental Research*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110812>
3. Benghanem, M., Mellit, A., & Emad, M. (2022). IoT-based performance analysis of hybrid solar heater-double slope solar still. *WATER SUPPLY*, 22(3), 3027-3043. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.414>
4. Benghanem, M., Mellit, A., Emad, M., & Aljohani, A. (2021). Monitoring of Solar Still Desalination System Using the Internet of Things Technique. *ENERGIES*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/en14216892>
5. Bisaga, I., Puzniak-Holford, N., Grealish, A., Baker-Brian, C., & Parikh, P. (2017). Scalable off-grid energy services enabled by IoT: A case study of BBOX SMART Solar. *ENERGY POLICY*, 109, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.07.004>
6. Burbano, A. M. (2014). Evaluation of basin and insulating materials in solar still prototype for solar distillation plant at kamusuchiwo community, high guajira. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(12), 547-552. <https://doi.org/10.24084/repqj12.395>
7. Chakravarthy, M. R. D., Gopalakannan, V., Prasanth, S. V, & Yogeshwaran, V. (2022). Treatment of Brackish Water Using Acrylic Solar Still with Concentrating Dish. *Indian Journal of Environmental Protection*, 42(3), 350-356. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85131233893&partnerID=40&md5=17c5ce0cbc8c3c59b637dbc9731eba4f>
8. Dellicompagni, P., & Franco, J. (2019). Potential uses of a prototype linear Fresnel concentration system. *Renewable Energy*, 1044-1054. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.005>
9. Elashmawy, M. (2017). An experimental investigation of a parabolic concentrator solar tracking system integrated with a tubular solar still. *Desalination*, 411, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.02.003>
10. Essa, F. A., Abdullah, A., Majdi, H. S., Basem, A., Dhahad, H. A., Omara, Z. M., Mohammed, S. A., Alawee, W. H., Ezzi, A. A., & Yusaf, T. (2022). Parameters Affecting the Efficiency of Solar Stills—Recent Review. *Sustainability (Switzerland)*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/su141710668>

11. Gil, J. D., Munoz, M., Roca, L., Rodriguez, F., & Berenguel, M. (2019). An IoT based control system for a solar membrane distillation plant used for greenhouse irrigation. *Global IoT Summit, GloTS 2019 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/GIOTS.2019.8766370>
12. Khechekhouche, A., Manokar, A. M., Sathyamurthy, R., Essa, F. A., Sadeghzadeh, M., & Issakhov, A. (2021). Energy, Exergy Analysis, and Optimizations of Collector Cover Thickness of a Solar Still in El Oued Climate, Algeria. *International Journal of Photoenergy*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6668325>
13. Meukam, P., Njomo, D., Gbane, A., & Toure, S. (2004). Experimental optimization of a solar still: Application to alcohol distillation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(12), 1569-1577. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.02.007>
14. Muñoz, M., Gil, J. D., Roca, L., Rodríguez, F., & Berenguel, M. (2020). An iot architecture for water resource management in agroindustrial environments: A case study in almería (Spain). *Sensors (Switzerland)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030596>
15. Naciones Unidas. (2017). *Objetivos de Desarrollo Sostenible Manual de referencia Sindical sobre la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
16. Paul, B., Agnihotri, S., Kavya, B., & Tripathi Prachi and Babu, N. C. (2022). Sustainable Smart Aquaponics Farming Using IoT and Data Analytics. *JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGY RESEARCH*, 15(1). <https://doi.org/10.4018/JITR.299914>
17. Sales, M. T. B. F. (2016). Solar powered desalination system using Fresnel lens. In K. K. (Ed.), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 162, Issue 1). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/162/1/012002>
18. Sandhu, M. M., Khalifa, S., Jurdak, R., & Portmann, M. (2021). Task Scheduling for Energy-Harvesting-Based IoT: A Survey and Critical Analysis. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 8(18), 13825-13848. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3086186>
19. Singh, D. B., & Tiwari, G. N. (2017a). Exergoeconomic, enviroeconomic and productivity analyses of basin type solar stills by incorporating N identical PVT compound parabolic concentrator collectors: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 135, 129-147. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.039>
20. Singh, D. B., & Tiwari, G. N. (2017b). Performance analysis of basin type solar stills integrated with N identical photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC) collectors: A comparative study. *Solar Energy*, 142, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.047>
21. Sivakumar, V., & Ganapathy Sundaram, E. (2013). Improvement techniques of solar still efficiency: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 246-264. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.037>
22. Yousefi, H., Aramesh, M., & Shabani, B. (2021). Design parameters of a double- slope solar still: Modelling, sensitivity analysis, and optimization. *Energies*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/en14020480>

FINANCIACIÓN

No existe financiación para el presente trabajo.

CONFLICTO DE INTERES

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Roger David Pimienta Barros.

Investigación: Roger David Pimienta Barros.

Metodología: Roger David Pimienta Barros.

Administración del proyecto: Roger David Pimienta Barros.

Redacción-borrador original: Roger David Pimienta Barros.

Redacción-revisión y edición: Roger David Pimienta Barros.