

Investiga.TEC


ISSN 1659-3383

VOLUMEN 18 • NÚMERO 53 • MAYO DEL 2025

Uso de bioestimulantes a base de microalgas en planes de manejo orgánico de papa (*Solanum tuberosum* L.)



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

 portal investiga.TEC

Investiga.TEC es una publicación digital de carácter divulgativo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Es una revista cuatrimestral, gratuita y dirigida al público en general, cuyo propósito es divulgar el aporte que el TEC hace a la sociedad costarricense en distintos campos de la ciencia, la tecnología, la investigación y la extensión.

Editora

Ileana León Boza

Comité Editorial

Andrés Robles Ramírez

Dagoberto Arias Aguilar

David Porras Alfaro

Ileana León Boza

Maribel Jiménez Montero

Contacto

Teléfono: +506 2550 9566

Correo electrónico:

revistainvestiga.tec@itcr.ac.cr

Apartado postal:

159-7050, Cartago, Costa Rica.

Diseño y Diagramación

Unidad de Publicaciones (TEC)



La fotografía de portada hace referencia al artículo que ofrecemos en la página 37, titulado "Uso de bioestimulantes a base de microalgas en planes de manejo orgánico de papa (*Solanum tuberosum* L.)".

Créditos de la imagen:

www.freepik.com

Presentación

Nos complace presentarles una nueva edición de la Revista Investiga.TEC, en la que convergen proyectos y reflexiones desde distintas áreas del conocimiento, todos con un objetivo común: generar soluciones pertinentes y sostenibles para los desafíos que enfrentamos como sociedad.

En este número, iniciamos con un valioso trabajo que fortalece la gestión forestal comunitaria en el Territorio Indígena Alto Chirripó, mediante el uso de especies locales para la construcción de viviendas culturalmente pertinentes. Este artículo resalta el poder transformador del conocimiento compartido entre comunidades indígenas, estudiantes y profesionales del ámbito forestal.

Seguimos con una propuesta de coordinación interinstitucional para apoyar la producción sostenible en la Región Huetar Norte. Este modelo busca mejorar la articulación entre instituciones públicas y actores productivos, promoviendo un desarrollo rural más coherente y efectivo.

En el campo de la ingeniería, incluimos un estudio experimental sobre un intercambiador de calor compacto con esponjas metálicas, que aprovecha tecnologías emergentes como la impresión 3D para mejorar la eficiencia térmica. Asimismo, exploramos el uso de simulación de eventos discretos como herramienta para optimizar la capacidad instalada en servicios de salud, una apuesta por una gestión más inteligente de recursos limitados.

La investigación agrícola también tiene un espacio en esta edición, con un artículo sobre el uso de bioestimulantes a base de microalgas en el cultivo de papa orgánica. Los resultados muestran el potencial de estas prácticas para mejorar la sostenibilidad en la producción de alimentos.

En el ámbito educativo, presentamos los resultados obtenidos del proyecto EVEPRIM, que desarrolla Recursos Educativos Abiertos para fortalecer la enseñanza de la matemática en la educación primaria costarricense. Un aporte significativo a la equidad y calidad educativa.

Finalmente, cerramos con un análisis del límite técnico para la integración de energías renovables en las redes eléctricas del país. Este artículo propone soluciones prácticas para una transición energética robusta, sostenible y basada en evidencia.

Les invitamos a explorar estos contenidos y a seguir promoviendo la investigación como motor de transformación social.

Contenidos

Fortaleciendo la gestión forestal comunitaria:
uso de madera para construcción de viviendas
con identidad. Territorio indígena Alto Chirripó 4

Diseño de un modelo práctico de
coordinación interinstitucional para apoyar
el fortalecimiento de la producción sostenible
en la Región Huetar Norte..... 14

Desarrollo de un intercambiador de
calor compacto con esponjas metálicas..... 20

Validación de una metodología para la
optimización de la capacidad instalada en
servicios de salud mediante simulación
de eventos discretos 29

Uso de bioestimulantes a base de
microalgas en planes de manejo orgánico
de papa (*Solanum tuberosum* L.) 37

EVEPRIM: Recursos Educativos Abiertos
para la Enseñanza de la Matemática en la
Educación Primaria de Costa Rica 46

Análisis del Límite Técnico en la
Integración de Energías Renovables y
Generación Distribuida en las
Redes Eléctricas de Costa Rica 50

Fortaleciendo la gestión forestal comunitaria: uso de madera para construcción de viviendas con identidad. Territorio indígena Alto Chirripó

Verónica Villalobos-Barquero

Escuela de Ingeniería Forestal
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ vvillalobos@itcr.ac.cr

Luis Diego Camacho-Cornejo

Escuela de Ingeniería Forestal
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ dicamacho@itcr.ac.cr

Resumen

Los resultados se derivan del trabajo realizado con las comunidades del Territorio Indígena Alto Chirripó, en el distrito de Chirripó, Cartago, Costa Rica. Se capacitó a 15 personas indígenas del en el uso de instrumentos de medición forestal. El plan de capacitación, diseñado en colaboración con líderes comunitarios, combinó aspectos teóricos, prácticos, culturales y ambientales. Los participantes, junto con estudiantes de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y extensionistas, ejecutaron inventarios y censos forestales para recolectar datos silviculturales, como diámetro, altura, especies, calidad de trozas y estado fitosanitario de los árboles. Las especies como el Copal, Guayabillo, y Robles se destacaron por su potencial para la construcción de viviendas. En cuanto a la vivienda actual y percepción de habitabilidad, se entrevistaron 56 familias indígenas. El 65% de las viviendas está construida principalmente con madera. Las familias mostraron preferencia por la madera, además de la madera, un 31% de las familias expresó interés en la cerámica como material para sus hogares, seguido por un 10% que indicó preferencia por materiales prefabricados. Finalmente, el 45,2% de los entrevistados aún prefieren que el sanitario se encuentre en un espacio fuera de la vivienda.

Palabras clave: desarrollo comunitario, sostenibilidad, recursos naturales, manejo forestal

Abstract

The results are the product of the work carried out with the communities of the Alto Chirripó Indigenous Territory, in the district of Chirripó, Cartago, Costa Rica. Fifteen indigenous people were trained in the use of forestry measurement instruments. The training plan, designed in collaboration with community leaders, combined theoretical, practical, cultural and environmental aspects. The participants, together with forestry engineering students from the Instituto Tecnológico de Costa Rica and extensionists, carried out forest inventories and censuses to collect silvicultural data such as diameter, height, species, log quality and tree health. Species such as Copal, Guayabillo, and Robles were highlighted for their potential for housing construction. In terms of current housing and perception of habitability, 56 indigenous families were interviewed. Sixty-five percent of the houses are mainly built with wood. The families showed a preference for wood; in addition to wood, 31% of the families expressed interest in ceramic as a material for their homes, followed by 10% who indicated a preference for prefabricated materials. Finally, 45.2% of those interviewed still prefer the toilet to be located in a space outside the dwelling.

Key words: community development, sustainability, natural resources, forest management.

Introducción

Una de las principales dificultades sociales que enfrentan las familias en los diferentes territorios indígenas de Costa Rica es la falta de una vivienda digna, pues las casas a menudo son prefabricadas y construidas con materiales inadecuados para el clima local, lo que afecta su durabilidad y habitabilidad, además de no estar alineados con la cosmovisión y tradiciones de sus habitantes. De acuerdo con el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) [1], la vivienda actual consiste en ranchos de paja en mal estado o bien, viviendas de Bono social (beneficio otorgado por instituciones gubernamentales) de mala calidad, por el paso del tiempo, que no se adaptan a la cultura cabécar.

Por otro lado, existe una buena disposición del gobierno costarricense por medio del Banco Hipotecario de la Vivienda (BANHVI) a dar soluciones de vivienda digna con el material constructivo madera que cumpla con las condiciones mínimas de calidad para garantizar vida útil de la vivienda, sin embargo, aunque sí aprovechan sus bosques para extraer la madera como material en la construcción [2], algunos territorios indígenas no cuentan con las estrategias necesarias que permitan el manejo adecuado y sostenible de sus recursos forestales.

Basado en lo anterior es que la Escuela Ingeniería Forestal, a través de un proyecto de extensión en el Territorio Indígena Alto Chirripó, ha promovido el uso de la madera como material constructivo sostenible y reconocido como material ancestral de construcción en comunidades indígenas, esto en concordancia con los ODS 9: Innovación en infraestructura habitacional familias vulnerables, 10: Reducción de desigualdades con aporte a una vivienda digna y 11: Comunidades sostenibles al utilizar madera como material renovable que almacena carbono.

Metodología

Sitio de estudio

El proyecto se desarrolló en las comunidades de Alto Quetzal y Tsipisí ubicadas en el Territorio Indígena (TI) Alto Chirripó en el distrito de Chirripó, cantón de Turrialba, provincia de Cartago. Los bosques ubicados dentro del TI Alto Chirripó se encuentran entre los 1000 y 2800 msnm, en la zona climática denominada como subtropical muy húmedo, con una precipitación anual entre los 2000 y los 8000 mm [3]. El Territorio Indígena Alto Chirripó, de ahora en adelante TIAC, es el territorio más extenso del país con 77, 97 hectáreas y el segundo más poblado [1]. Según [4], para el 2011 la población del TIAC era de 2079 hombres y 2106 mujeres para un total de 4185. El distrito de Chirripó es el distrito con índice de desarrollo social (IDS) más bajo, siendo para el año 2017 un 0 %, lo que lo ubicaba de 483 entre los 483 distritos [5].

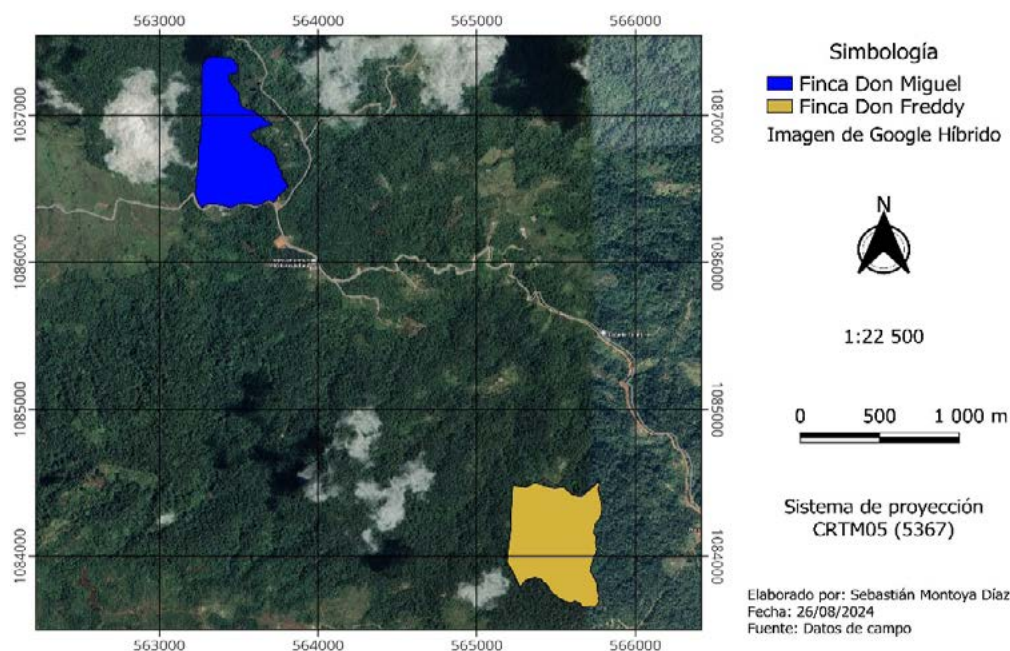


Figura 1. Ubicación de las unidades de muestreo para el diseño de los planes generales de manejo. Territorio Indígena Alto Chirripó.

Caracterización de los bosques del Territorio Indígena Alto Chirripó

Para la recolección de los datos silviculturales de los bosques como, por ejemplo: diámetro, altura, especie, calidad de las trozas y estado fitosanitario de los árboles, se capacitó un grupo de 15 personas indígenas de distintas comunidades dentro del TIAC. A través de reuniones previas con líderes de las comunidades y miembros de la junta directiva, se diseñó un plan de capacitación que incorporara elementos técnicos teórico-prácticos, culturales y ambientales que permitiera a los participantes conocer sobre el uso de instrumentos de medición forestal. Estos participantes recibieron capacitación técnica a través de talleres y prácticas de campo fortaleciendo sus capacidades y fomentando una gestión forestal comunitaria responsable. Las personas capacitadas en conjunto con los estudiantes de la carrera de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y los extensionistas fueron los encargados de ejecutar los inventarios y censos forestales. De la masa forestal existente se identificaron, de acuerdo con sus características técnicas, aquellas especies que sirven como materia prima para la construcción de casas dentro del territorio. (Figura 2)



Figura 2. Capacitación bridada sobre el uso de instrumentos de medición forestal. Territorio Indígena Alto Chirripó.

Fuente: propia, 2023

Caracterización de la vivienda actual y percepción de habitabilidad de los pobladores del Territorio Indígena Alto Chirripó

La estrategia metodológica de abordaje del tema de la madera en la vivienda indígena se basó en diagnósticos de percepción de habitabilidad, es decir, la manera en que las personas sienten que el espacio en donde habitan cumple con las condiciones necesarias para ser considerado cómodo o funcional; y del tipo de materiales empleados en la construcción de las viviendas antiguas y las viviendas actuales bajo el sistema de donación del Estado costarricense.

Se realizaron visitas pie a pie a diferentes familias seleccionadas al azar en las dos comunidades del TIAC, las cuales eran candidatas para optar por el beneficio del Bono de vivienda social que otorga el Banco Hipotecario de Vivienda del Gobierno de Costa Rica. Se diseñó un formulario estructurado con preguntas orientadas a recolectar información relevante sobre los materiales empleados, el estado de las viviendas y las percepciones comunitarias en torno al uso de la madera como recurso constructivo. Dichos formularios fueron validados previamente con un grupo piloto de la población, asegurando su pertinencia y eficacia. La ejecución del diagnóstico incluyó la participación de estudiantes de Ingeniería Forestal, quienes, además de aplicar los instrumentos de recolección de datos, promovieron una extensión forestal directa al compartir conocimientos sobre la importancia del manejo sostenible del bosque. (Figura 3)



Figura 3. Diagnóstico del estado de la vivienda indígena actual realizado en colaboración con estudiantes universitarios. Territorio Indígena Alto Chirripó.

Fuente: propia, 2023

Resultados

Caracterización de los bosques del Territorio Indígena Alto Chirripó

El proceso de capacitación no solo transfirió conocimientos técnicos al grupo de personas seleccionadas, sino que también impulsó la participación de las comunidades en el manejo de sus bosques, lo que promueve la extensión forestal como herramienta clave para integrar el conocimiento técnico y la participación local en la gestión sostenible de los recursos naturales. Este enfoque integral asegura que el aprovechamiento de los recursos forestales se realice de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente. En el trabajo de campo, se censaron 1,136 árboles en pie con diámetros óptimos para cosecha (>40 cm). De estos, 525 fueron clasificados como árboles de futura cosecha, lo que significa que aún no alcanzan el diámetro mínimo requerido según las normativas forestales vigentes. Además, se identificaron 347 árboles como individuos remanentes, garantizando la permanencia de estas especies en los bosques. Un total de 178 árboles cumplió con los criterios técnicos y legales para cosecha inmediata, mientras que 36 individuos fueron clasificados como pertenecientes a especies poco frecuentes. Esta última clasificación es fundamental, ya que subraya la necesidad de priorizar la conservación, reproducción y establecimiento de estas especies en los bosques del territorio.

El análisis permitió identificar las ocho especies comerciales y aprovechables más frecuentes en los bosques del TIAC, como se detalla en el Cuadro 1. Entre estas, el Copal (*Dacryodes talamancensis*.), el Guayabillo (*Matudaea trinervia*), y los Robles (*Quercus spp.*) destacaron como las especies con mayor potencial para su uso en la construcción de viviendas, debido tanto a sus características físico-mecánicas como a su abundancia relativa en la región.

Cuadro 1. Especies comerciales con potencial de aprovechamiento. Territorio Indígena Alto Chirripó.

	Nombre común	Nombre científico
1	Copal	<i>Dacryodes talamancensis</i>
2	Fruta dorada 2	<i>Virola montana</i>
3	Guayabillo	<i>Matudaea trinervia</i>
4	Jorco	<i>Garcinia sp.</i>
5	Gaolin	<i>Alfaroa costaricensis</i>
6	Jaulin	<i>Alfaroa manningii</i>
7	Roble	<i>Quercus insignis</i>
8	Roble blanco	<i>Quercus corrugata</i>

Los resultados fueron expuestos a los miembros de la Junta Directiva, quienes conocieron sobre las especies potenciales presentes en sus bosques (Figura 4).

**Figura 4.** Socialización de los resultados obtenidos con los planes generales de manejo. Territorio Indígena Alto Chirripó.

Fuente: propia, 2023

Caracterización de la vivienda actual y percepción de habitabilidad de los pobladores del Territorio Indígena Alto Chirripó

La evaluación incluyó una muestra aleatoria de 56 familias distribuidas en diversas comunidades del TIAC, promoviendo un enfoque participativo y culturalmente sensible propio de la extensión forestal. De los entrevistados, el 6,44% fueron varones y el 93,56% mujeres, con una edad promedio de 29,7 años, lo que refleja la importancia del papel de las mujeres como protagonistas en la toma de decisiones relacionadas con sus hogares y el entorno. En cuanto a los resultados sobre percepción de habitabilidad, el 68% de las familias expresó agrado por su vivienda actual, mientras que el 32% manifestó insatisfacción. Este dato resulta clave para vincular la habitabilidad con el uso potencial de recursos forestales locales, como la madera, en el mejoramiento de viviendas. En temas de tipo cultural-ancestral como funerales, nacimientos, fechas importantes, entre otras, el 71% de las familias

realizan actividades en las afueras de la casa, pero el 94% lo hace dentro de la casa. Por otra parte, el 29% de las familias mencionó que no hacen actividades culturales fuera de la casa y el 6% no las realiza dentro de las viviendas. (Figura 5).

Por otra parte, el detalle de las actividades culturales-ancestrales que realizan las familias indígenas, sea dentro o fuera de la vivienda, se desglosa de la siguiente forma: los velorios en un 35,5%, le siguen las fiestas con el 22,6%, visitas de familiares un 16,1% y finalmente, un porcentaje de 9,7% de los entrevistados no responde sobre estos temas. Otras actividades son nacimientos, novenarios, dietas y tratamientos, estos sumados son el 16,1.

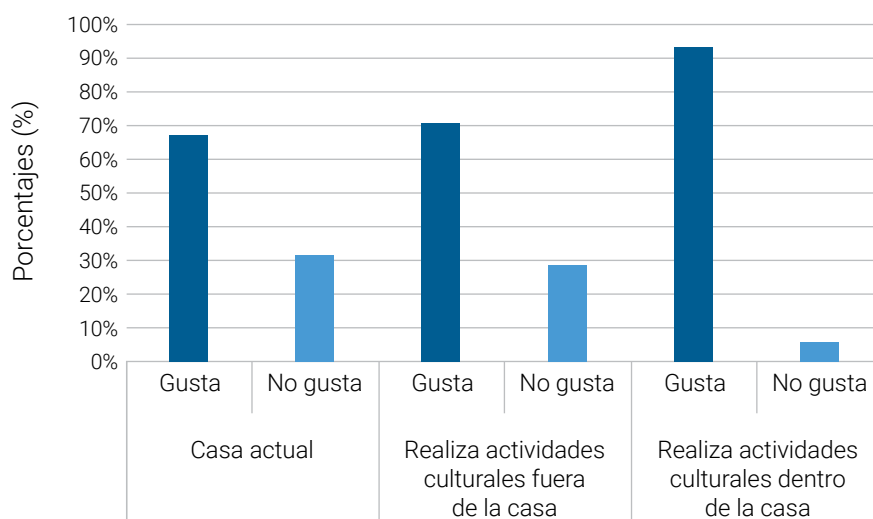


Figura 5. Aspectos relacionados a la sociabilidad actual. Territorio Indígena Alto Chirripó.

En la consulta realizada a las familias sobre los materiales constructivos predominantes en sus viviendas actuales, se observó que la madera prevalece como el material principal en el 65% de los casos, destacándose como un recurso ampliamente utilizado por su disponibilidad local y sus características culturales y funcionales. Además, se identificaron viviendas construidas con caña (13%), lo que evidencia la adaptación de las comunidades a recursos naturales disponibles en el entorno. Con porcentajes menores, se encontraron diversas combinaciones de materiales que reflejan estrategias constructivas locales, como madera-concreto; sistemas prefabricados en concreto; y el tipo sócalo, que utiliza bloques de concreto en tres hiladas desde el cimiento, combinados con madera. Asimismo, se observó el uso de combinaciones como madera-tierra y otras variaciones que integran materiales accesibles y adaptados a las condiciones del territorio (Figura 6). Estos resultados señalan la necesidad de fortalecer la gestión forestal en las comunidades, promoviendo prácticas de manejo sostenible de los recursos forestales locales y capacitando a las familias en el uso eficiente de la madera y otros materiales. Esto garantizará la sostenibilidad de las construcciones y la conservación de los ecosistemas forestales que proveen dichos recursos.

Material utilizado actualmente

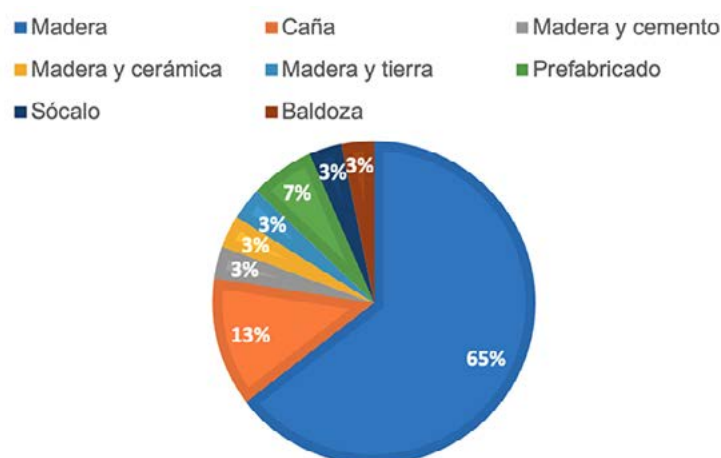


Figura 6. Materiales de construcción de la vivienda actual en el Territorios Indígenas. Territorio Indígena Alto Chirripó.



Figura 7. Vivienda madera y vivienda en caña. Territorio Indígena Alto Chirripó.

Fuente: propia, 2023.

A las familias consultadas, seleccionadas como posibles beneficiarias del bono de vivienda otorgado por el BANHVI en territorios indígenas, se les indagó sobre sus preferencias respecto al tipo de material constructivo para sus futuras viviendas. Los resultados revelaron que la madera destaca como el material preferido, con un 33% de las respuestas, lo que resalta su importancia cultural y funcional en estas comunidades. De ahí la necesidad de integrar prácticas de manejo forestal sostenible para garantizar el acceso a madera de calidad como recurso renovable y local. Además de la madera, un 31% de las familias expresó interés en la cerámica como material para sus hogares, seguido por un 10% que indicó preferencia por materiales prefabricados. En porcentajes menores, las preferencias incluyeron el concreto, el cemento, (se respeta la respuesta del indígena, aunque cemento es igual al concreto), metal y otros materiales (Figura 8). La identificación de estas preferencias proporciona una base para desarrollar estrategias de manejo forestal comunitario que permitan abastecer de manera sostenible la demanda de madera, al tiempo que se capacita a las comunidades en su uso adecuado para la construcción de viviendas. Este enfoque no solo busca satisfacer necesidades habitacionales, sino también fomentar la conservación y regeneración del recurso forestal en el territorio indígena.

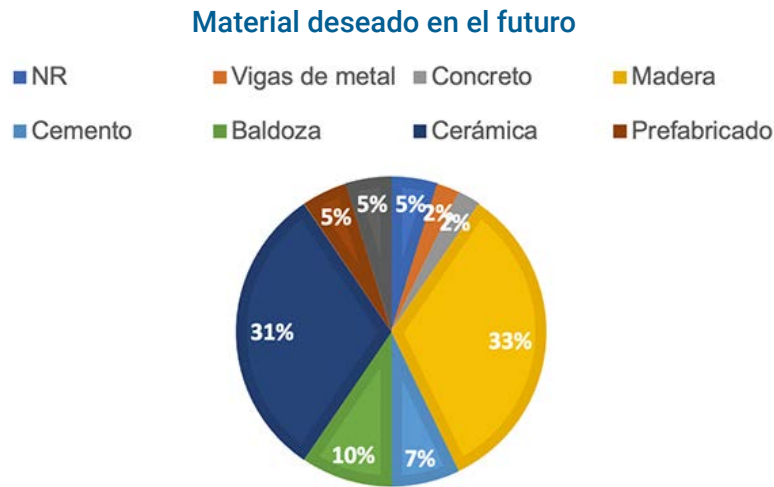


Figura 8. Material futuro de las viviendas. Territorio Indígena Alto Chirripó.

Finalmente, el estudio indagó sobre las expectativas de las familias respecto a la distribución interna de las nuevas viviendas, revelando aspectos importantes relacionados con la funcionalidad, la cultura y las prácticas tradicionales del territorio indígena. Un 54,8% de las familias expresó su preferencia por una vivienda con un único espacio que integre los dormitorios, la cocina y el sanitario, lo cual refleja una tendencia hacia un diseño más compacto y funcional. Por otro lado, el 45,2% restante manifestó una inclinación por una disposición donde los dormitorios se encuentren dentro de la vivienda, pero con la cocina y el sanitario ubicados en espacios externos. Esta preferencia podría estar asociada a costumbres culturales, como la preparación de alimentos en fogones que producen humo o prácticas sanitarias tradicionales que evitan que el baño esté dentro del hogar, además de consideraciones climáticas propias de la región.

Cuadro 2. Distribuciones ideales para vivienda futura indígena. Territorio Indígena Alto Chirripó.

Distribución	Porcentaje (%)
Cuartos + sanitario + cocina (agrupados)	54,8
Cuarto, cocina y sanitario afuera	45,2

Estos resultados destacan la importancia de integrar estos detalles en el diseño y construcción de las viviendas, promoviendo el uso sostenible de materiales como la madera y adaptando las distribuciones internas a las preferencias y necesidades culturales de las familias. Capacitar a las comunidades en el uso eficiente de los recursos forestales locales, junto con el diseño de viviendas que equilibren tradición y modernidad, contribuirá al desarrollo de espacios habitacionales sostenibles y culturalmente pertinentes en el Territorio Indígena Alto Chirripó.

El proyecto desarrollado no solo aportó información sobre las percepciones y prácticas habitacionales, sino que también abrió un espacio para dialogar sobre el potencial de la madera como un recurso renovable y culturalmente apropiado para la construcción de viviendas.

Conclusión

La construcción de viviendas sociales con madera proveniente de los propios territorios indígenas en Costa Rica representa un paso significativo hacia la autosuficiencia, el respeto cultural y la sostenibilidad. Este enfoque no solo contribuye a la mejora de las condiciones de vida en estas comunidades, sino que también refuerza el vínculo con la tierra y los recursos naturales fundamentales para la identidad y el bienestar de los pueblos indígenas, ya que el uso de madera local permite a las comunidades mantener y transmitir conocimientos ancestrales sobre la gestión forestal y la construcción, adaptando técnicas tradicionales a las necesidades contemporáneas. Además, esta práctica promueve la preservación de los bosques y la biodiversidad, al fomentar un manejo responsable y sostenible de los recursos naturales.

Bibliografía

- [1] Sistema Nacional de Áreas de Conservación, "Caracterización de los territorios indígenas Chirripó, Bajo Chirripó y Nairi Awari," 2016. [En línea]. Disponible en: <https://canjeporbosques.org/wp-content/uploads/2017/07/Caracterizaci%C3%B3n-de-los-Territorios-Ind%C3%ADgenas.pdf>.
- [2] M. E. Carrión Narváez, "Participación indígena en el desarrollo de políticas y en la gobernanza local sobre los recursos forestales. Caso de estudio: Reserva Indígena Cabécar de Alto Chirripó, Costa Rica," CATIE, 2012.
- [3] C. Brenes Granados, "Tecnologías de Información y Comunicación: el caso de las comunidades indígenas cabécares de Chirripó de Costa Rica," pp. 177–192, 2007, [En línea]. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1941/194120544017.pdf>
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Censo, "Estadísticas Nacionales del 201," 2012. [En línea]. Disponible en: <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>.
- [5] Instituto Nacional de Estadística y Censo, "X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011 Territorios Indígenas. Principales indicadores demográficos y socioeconómicos.," 2013. [En línea]. Disponible en: https://inie.ucr.ac.cr/descarga/KOHA-PDF/Territorios_Indigenas.pdf.

Sobre los autores

Verónica Villalobos-Barquero

Ingeniera Forestal, cuenta con una Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción, es docente de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica. ORCID: 0000-0003-3449-6721

Diego Camacho-Cornejo

Ingeniero Forestal, cuenta con un Master of Business Administration, es docente en la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica. ORCID: 0000-0001-7760-9664

Diseño de un modelo práctico de coordinación interinstitucional para apoyar el fortalecimiento de la producción sostenible en la Región Huetar Norte.

Máster Francisco Céspedes-Obando

Carrera de Gestión de Turismo Rural Sostenible
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ fcespedes@itcr.ac.cr

Máster Ligia Guerrero-Vargas

Carrera de Administración de Empresas
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ lguerrero@itcr.ac.cr

Máster Erick Pérez- Murillo

Carrera de Ingeniería en Producción Industrial
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ eperez@itcr.ac.cr

Resumen

El proyecto Diseño de un modelo de coordinación interinstitucional para apoyar el fortalecimiento de la producción sostenible en la Región Huetar Norte, plantea el diseño y la validación de un modelo de coordinación interinstitucional para la participación conjunta de las instituciones de la región que apoyan de manera directa e indirecta, la gestión empresarial y el desarrollo de la producción agropecuaria y de valor agregado en la Región Huetar Norte, entre las que se pueden citar el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Instituto Nacional de Aprendizaje (INA), el Instituto de Desarrollo Rural (INDER) entre otras. El proyecto contó con financiamiento externo por parte de Fundecooperación para el Desarrollo Sostenible, y se manejó operativamente con la coadyuvancia de la Fundación Tecnológica de Costa Rica (FUNDATEC).

En este artículo se expone el modelo planteado y las principales consideraciones que se deben tener en cuenta para ponerlo en funcionamiento.

Palabras clave: Modelo Interinstitucional, Sostenibilidad, Producción Agropecuaria

Abstract

The project Design of an inter-institutional coordination model to support the strengthening of sustainable production in the Northern Huetar Region proposes the design and validation of a coordination model for the joint participation of institutions in the region that directly and indirectly support business management and the development of agricultural and value-added production in the Northern Huetar Region. These institutions include the Ministry of Agriculture and Livestock (MAG), the National Learning Institute (INA), the Rural Development Institute (INDER), among others. The project was externally funded by Fundecooperación for Sustainable Development and was operationally managed with the assistance of the Costa Rica Institute of Technology Foundation (FUNDATEC). This article presents the proposed model and the main considerations to take into account for its implementation.

Keywords: Inter-institutional Model, Sustainability, Agricultural Production

Introducción

La coordinación interinstitucional se puede definir como perteneciente o referida a dos o más instituciones relacionadas entre sí. [1]

En un sondeo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) sobre las necesidades clave de apoyo de los países en desarrollo para la implementación de sus contribuciones determinadas a nivel nacional, se encontró que una de las cuatro principales necesidades identificadas por los países participantes es la construcción de estructuras institucionales y mecanismos de coordinación. Esta necesidad fue identificada por el 61% de los países encuestados [2]. En este estudio se reconoce también esta necesidad, pero señala que no existe un modelo o un manual de buenas prácticas que permita transferir las lecciones aprendidas de un país a otro.

La articulación interinstitucional hace alusión a la necesidad de asociar los niveles de gobierno con las instituciones que lo constituyen con el fin de aumentar los recursos y capacidades, así como a lograr objetivos y acciones. Sin embargo, la articulación es necesaria dentro y fuera de las instancias de gobierno, y por eso también se origina a partir de la organización entre varias instituciones públicas, privadas o de la sociedad civil [3]. Para que la articulación funcione, las actividades específicas requieren que cada integrante acepte una o varias tareas puntuales sin que se genere entre ellas relaciones de subordinación.

Problema

El problema central que se busca resolver es la falta de coordinación efectiva entre las instituciones que brindan apoyo a los pequeños productores agropecuarios y PYMES de la Región Huetar Norte. Actualmente, estas instituciones operan de manera aislada, duplicando esfuerzos y desperdiciando recursos que podrían ser utilizados de manera más eficiente. El proyecto tiene como objetivo diseñar un modelo que permita una colaboración más estrecha y ordenada entre las instituciones, asegurando que el apoyo llegue a los productores de manera oportuna y efectiva, contribuyendo así al fortalecimiento de la producción sostenible.

El ente encargado de implementar este modelo será una instancia que definan las mismas instituciones participantes, que actuará como coordinador entre ellas y sus esfuerzos por mejorar el desarrollo de la región.

Desarrollo

En este capítulo se puntualiza en la metodología utilizada para la elaboración de las etapas para el diseño del modelo, tales como la lista de instituciones participantes, los planes y programas institucionales, las actividades de coordinación, herramientas de monitoreo y evaluación, así como el diseño del modelo.

Etapas del diseño del modelo

Primera etapa

La primera acción realizada consistió en un levantamiento de las instituciones gubernamentales, educativas públicas y privadas, de formación técnica y asociaciones con presencia en la región, cuya labor estuviera en mayor, o menor grado, relacionada con el apoyo a grupos de productores agropecuarios y de valor agregado. Al mismo tiempo que se levantaba la lista, se añadían los nombres de las personas a las que se debían contactar para explicarles el propósito del proyecto.

Para lograr esto, se llevaron a cabo dos acciones: enviar correos electrónicos y hacer llamadas telefónicas de seguimiento.

Segunda etapa

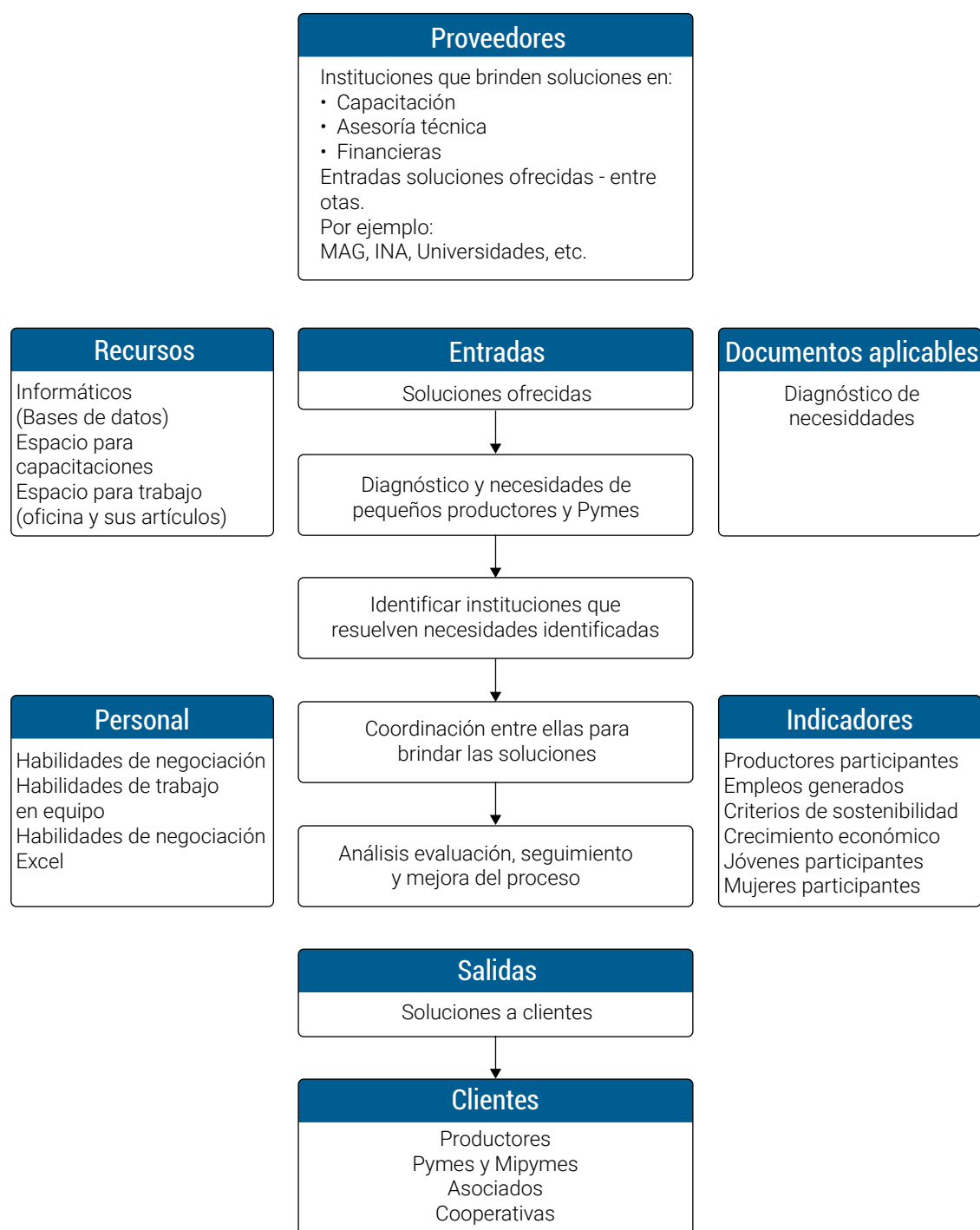
Seguidamente, se hizo un levantamiento de planes y programas institucionales. La Región Huetar Norte cuenta con una densidad institucional, que le permite contar con asistencia técnica en procesos de orden productivo, sociales, y educativos. Los esfuerzos se emanan desde las diferentes instituciones, sin embargo, suelen carecer de coordinación interinstitucional.

Al diseñar un modelo práctico de coordinación interinstitucional, se busca que los programas de apoyo y asistencia, en cualquiera de sus formas, lleguen en el orden y la dosis adecuada, a quién los necesita y cuando los necesita con el objetivo de contribuir con la producción sostenible y la gestión empresarial de los productores agropecuarios y de valor agregado, y que este fortalecimiento facilite su inserción en nuevos mercados.

Figura 1. Lista de instituciones participantes

Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR)	Universidad Estatal a Distancia (UNED)
Universidad Técnica Nacional (UTN)	Escuela Técnica Agrícola Industrial (ETAI)
Agencia para el Desarrollo (ADEZN)	Instituto Nacional de la Mujer (INAMU)
Instituto de Desarrollo Rural (INDER)	Instituto Mixto de Ayuda Social (IMAS)
Instituto Costarricense de Turismo (ICT)	Instituto Nacional de Aprendizaje (INA)
Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)	Visión Mundial
Área de Conservación Arenal Huetar Norte (ACAHN)	Centro Agrícola Cantonal San Carlos (CACSC)

Además, como parte de las acciones del diseño del modelo, se realizaron dos actividades cuyo objetivo fue apoyar a los productores de la Zona Norte en materia de buenas prácticas agropecuarias y gestión empresarial, se contó con la participación de instituciones con vasto conocimiento; con la intención de hacer un ejercicio donde se evidencie la coordinación interinstitucional.

Figura 2. Modelo de coordinación interinstitucional

Tercera etapa

La figura 3, que representa el modelo de coordinación interinstitucional, es el resultado final de un proceso colaborativo entre diversas instituciones y actores locales. Para su diseño, se realizaron talleres participativos con representantes de instituciones clave, quienes proporcionaron información sobre las principales barreras para una coordinación efectiva. Además, se utilizaron técnicas de diagnóstico participativo para identificar las necesidades de los productores y las brechas en los servicios disponibles. La necesidad de contar con este modelo surgió de la ineficiencia observada en la entrega de asistencia técnica y apoyo a los pequeños productores de la Región Huetar Norte. El modelo fue desarrollado para responder a estos desafíos, optimizando los recursos y fortaleciendo la gestión empresarial de los productores.

Para poder llevar a cabo dicha gestión, es necesario conocer qué necesidades tienen los productores a fin de mejorar sus actividades productivas. El modelo sugiere la ejecución periódica de diagnósticos que revelen esas necesidades, pero que también permitan servir como insumo a los indicadores, a fin de registrar el progreso del modelo.

Conclusiones

El ente coordinador que se designe cuenta con el modelo como un insumo para contribuir al fortalecimiento de la producción sostenible en las comunidades agrícolas de la Región Huetar Norte.

El modelo detalla los pasos a seguir por el ente coordinador y las instituciones participantes, así como los recursos, personal, documentos aplicables e indicadores, necesarios para apoyar a los productores.

El diagrama de flujo (figura 3) detalla con mayor precisión la secuencia de acciones que deben realizarse para que el modelo funcione apropiadamente.

La herramienta de monitoreo y evaluación permite medir la eficacia de las actividades que se realizan por medio del modelo y su impacto sobre los indicadores del proyecto.

La logística implícita en la coordinación con las instituciones es tan amplia que este informe no podría abarcar cada detalle. La institución coordinadora del modelo, debe contar con el recurso humano, físico y tecnológico apropiado para llevar a cabo las tareas de manera que se cumpla con los objetivos propuestos.

Bibliografía

- [1] F. Céspedes, L. Guerrero y K. Murillo, «La importancia de la vinculación interinstitucional: La experiencia del proyecto Clínica Empresarial del TEC»,» *Ventana* 14, pp. 36-38, octubre 2020.
- [2] C. Díaz Rodríguez y J. Pulido Rosales, *Articulación interinstitucional y su influencia en la generación de valor público en la Municipalidad Provincial de Chepén, 2017*, Tesis de Maestría en Gestión Pública. Universidad César Vallejo, 2018.
- [3] O. Corrales, «Agencia para el desarrollo de la Zona Norte, 18 años de esfuerzo sostenido»,» *Revista Ventana* 13, pp. 34-35, Octubre 2020.
- [4] F. Céspedes, L. Guerrero y K. Murillo, «La importancia de la vinculación interinstitucional: La experiencia del proyecto Clínica Empresarial del TEC»,» *Revista Ventana* 14, pp. 36-38, octubre 2020.
- [5] FAO-FLODM, *Apoyo al Plan de Desarrollo Predial*, 2012.
- [6] MEIC, *Red de apoyo PYME*, 2021.
- [7] R. A. Española, 2020.
- [8] S. d. I. P. L. LAC, *Mecanismos de Coordinación Interinstitucional para una política climática efectiva en Latinoamérica y el Caribe*, 2017.

Sobre los autores:

Máster Francisco Céspedes-Obando

Máster Francisco Céspedes Obando, es docente de la Carrera de Gestión de Turismo Rural Sostenible perteneciente a la Escuela de Idiomas y Ciencias Sociales, Campus Tecnológico Local San Carlos. ORCID: 0000-0002-0368-2532

Máster Ligia Guerrero-Vargas

Máster Ligia Guerrero-Vargas es docente de la carrera de Administración de Empresas en el Campus Tecnológico Local San Carlos. ORCID: 0000-0001-7878-9062

Máster Erick Pérez-Murillo

Máster Erick Pérez Murillo es docente de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial en el Campus Tecnológico Local San Carlos, ORID: 0000-0002-5779-0563

Desarrollo de un intercambiador de calor compacto con esponjas metálicas

Moises Morera-Alfaro

Estudiante graduado
Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ mochemore@estudiantecr.onmicrosoft.com

Francisco Rodríguez-Mendez

Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ frarodriguez@itcr.ac.cr

Bruno Chinè-Polito

Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ bchine@tec.ac.cr

Marcela Meneses-Guzmán

Escuela de Ingeniería en Producción Industrial
Instituto Tecnológico de Costa Rica,
✉ mameneses@itcr.ac.cr

Resumen

Este artículo describe un trabajo de investigación desarrollado para evaluar experimentalmente un intercambiador de calor compacto fabricado mediante impresión 3D, en el cual se introducen esponjas metálicas de cobre para mejorar la superficie de intercambio térmico. Se han estudiado diversas condiciones de trabajo y configuraciones del dispositivo y los resultados experimentales han permitido obtener información para mejorar el sistema de intercambio de energía.

Palabras claves: Energía, dispositivos térmicos, materiales celulares, trabajo experimental.

Abstract

This paper describes a research work carried out to experimentally study a compact heat exchanger manufactured by 3D printing. The thermal device used metal sponges to increase the surface available for the heat transfer process. By studying several work conditions and different device configurations we obtained valuable experimental data to improve the energy transfer in the system.

Keywords: Energy, heat exchanger, cellular materials, experimental work.

Introducción

Debido a que el consumo de energía en el mundo crece, deben buscarse oportunidades para mejorar la eficiencia de su uso en, por ejemplo, aplicaciones de calentamiento, ventilación y aire acondicionado (HVAC, sigla en inglés de Calentamiento, Ventilación y Aire Acondicionado) de las instalaciones residenciales e industriales. El componente principal de un equipo HVAC es el intercambiador de calor, por lo que de este dependen la eficiencia energética, el costo y las dimensiones del sistema.

El uso de la energía generada a partir de combustibles fósiles acarrea un conjunto de problemáticas ambientales como la contaminación y el calentamiento global que impactan sobre nuestra sociedad y crean serias dificultades, ya no sostenibles. Costa Rica junto a países de todo el mundo, ha dado su adhesión a convenciones y protocolos internacionales referentes a Sostenibilidad y Cuidado del Medio Ambiente, comprometiéndose a dirigir sus esfuerzos para limpiar su huella de carbono y alcanzar condiciones de carbono neutralidad. En este sentido se precisa que el País se compromete a un máximo absoluto de emisiones de 9.374.000 TCO₂eq netas al 2030, con una trayectoria propuesta de emisiones de 1.73 toneladas netas per cápita para el 2030 [1]. También el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2022-2026 [2] confirma que Costa Rica tiene políticas ambiciosas para reducir de manera significativa sus emisiones. Además, especifica que el País está comprometido con una trayectoria de emisiones alineada con la meta, para la mitad de este siglo, de no aumentar más de 1.5°C la temperatura media respecto de los valores preindustriales.

En este ámbito, la comunidad científica trabaja para desarrollar soluciones eficientes y seguras, mejorando el desempeño de los dispositivos energéticos residenciales e industriales y reduciendo el impacto ambiental. En el caso de los sistemas de intercambio térmico se investigan soluciones que puedan aumentar la eficiencia del proceso, por ejemplo, usando superficies extendidas, nanofluidos, materiales porosos y celulares, efectos magnetocalóricos, entre otros. En este artículo se analiza un sistema de intercambio térmico que usa, como superficies extendidas de un intercambiador de calor compacto, esponjas metálicas de cobre (Fig. 1). Con el uso de estos materiales celulares se pretende aumentar la superficie de transferencia y así mejorar la eficiencia térmica del dispositivo. Las esponjas metálicas tienen una alta proporción de espacios vacíos (poros), los cuales brindan valores de superficie específica muy grandes [3,4]. Además, presentan un bajo valor de densidad, por lo que también es posible reducir el peso de los dispositivos térmicos.



Fig. 1. Esponja de cobre. [3]

Metodología

En el proyecto se han llevado a cabo actividades de diseño y construcción del intercambiador de calor, completándolo con un sistema de transporte y alimentación de los fluidos térmicos, así como con accesorios e instrumentos para la adquisición de los datos experimentales [5].

Se selecciona una alternativa de diseño de un intercambiador de calor compacto, de simple construcción y que permita incorporar modificaciones en su estructura durante el desarrollo del trabajo experimental. La Fig. 2 muestra el modelo modular del dispositivo elaborado en SolidWorks (Dassault Systèmes SolidWorks Co., Waltham, MA, USA), en el cual se aprecian centralmente las dos mitades de esponja de cobre, que se unen a unos pequeños tubos centrales de cobre donde circula agua caliente en dirección transversal al equipo. En las dos extremidades del dispositivo se posicionan dos conexiones, una en cada extremidad, con el propósito de unir el intercambiador al sistema de alimentación de aire frío que fluye en el equipo en dirección axial. Así se crea centralmente una transferencia de calor en régimen de flujo cruzado, entre el agua caliente que circula en los tubos y el aire frío en movimiento axial, usando las esponjas para extender la superficie exterior de los tubos de cobre y aumentar así la tasa de transferencia de energía térmica.

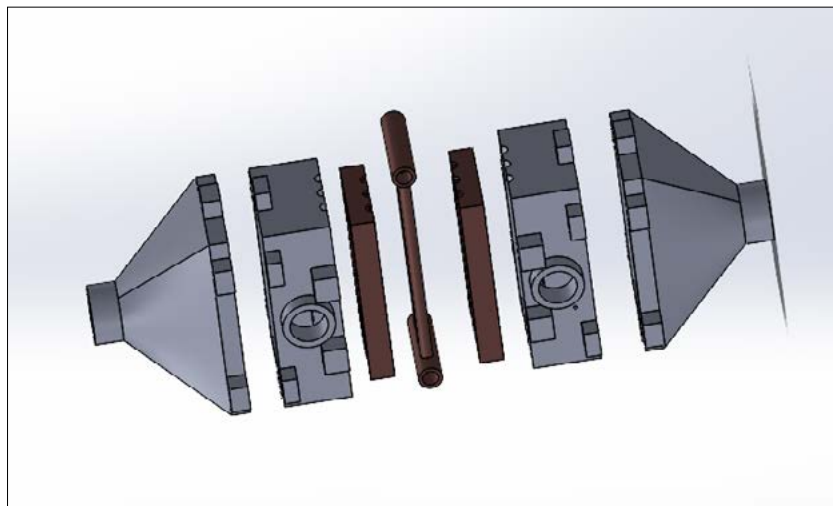


Fig. 2. Vista de las secciones del intercambiador de calor elaborado con SolidWorks. [5]

Sucesivamente, se construye el intercambiador de calor modular (Fig. 3) que incorpora partes en material plástico, representados por las componentes de extremidad del dispositivo y los elementos centrales para colocar las esponjas y tres pequeños tubos metálicos de cobre para la alimentación del agua. Las partes en material plástico se imprimen en la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial del TEC, con una impresora 3D usando resina polimérica. La manufactura del intercambiador se completa en el CIEMTEC (Centro de Investigación y Extensión en Materiales del TEC) ensamblando todos los elementos diseñados. Los tubos cilíndricos de cobre primero se cortan y sucesivamente se forman, usando un arreglo mecánico que permite doblarlos, sin deformar la sección transversal de geometría circular. Las esponjas metálicas ERG de 40 PPI seleccionadas [1], inicialmente de dimensiones 101.6 mm por 101.6 mm y espesor de 12.7 mm, se dividen en dos mitades iguales del mismo espesor, mediante una electro-erosionadora de hilo caliente. Posteriormente se unen las esponjas metálicas mediante grasa térmica a los tubos de cobre, donde circula internamente el agua caliente, con el propósito de reducir la resistencia térmica de contacto y mejorar así la transferencia de calor hacia el aire frío que se mueve en flujo cruzado. También se fabrican otros pequeños componentes estructurales para permitir el acceso de los fluidos y posicionar accesorios, instrumentación y sensores del sistema experimental. El circuito experimental de prueba se desarrolla en el Laboratorio de Materiales Porosos y Celulares ubicado en el CIEMTEC y se diseña planificando fundamentalmente dos secciones: la primera para alimentar el aire

al intercambiador; la segunda para permitir el flujo de agua hacia este. Los componentes principales del sistema son el compresor de aire, el tanque de almacenamiento y la bomba con inversor para el agua y los circuitos neumático e hidráulico para el movimiento de los dos fluidos. La adquisición digital de los datos se obtiene usando sensores de temperatura, flujo y presión y se controla mediante el software LabVIEW (National Instruments, Austin, TX, USA).



Fig. 3. Vista del Intercambiador de calor compacto fabricado mediante impresión 3D: se aprecian los tres tubos de cobre para la circulación del agua caliente y las dos mitades de esponjas de cobre que se unen a estos. [5]

Resultados

En la Fig. 4 se trazan las temperaturas de entrada y salida del aire, en correspondencia de diferentes caudales de agua, entre 1.0 gal/min y 3.0 gal/min y variando el caudal de entrada del aire desde 7.068 L/min hasta 23.408 L/min. Se logra apreciar el aumento en los valores de la temperatura de salida del aire, de hasta 5°C respecto de los valores de entrada, para cada prueba realizada. En este caso el incremento es observado para todos los caudales de agua ensayados, indicando que entre mayor sea el caudal de agua más calor recibe el aire.

En el caso de la Fig. 5 se muestran, para los caudales de agua de 0.5 a 3.0 gal/min, las temperaturas tanto de entrada como de salida del agua en función del caudal de aire. Se observa que existe una diferencia de temperatura muy pequeña, menor que 1°C, entre la entrada y la salida del agua. Alimentando el mismo caudal de agua, cuando en el intercambiador se añaden otros tres tubos de cobre, con las respectivas esponjas de cobre (es decir un total de seis tubos y cuatro superficies extendidas), los valores del intercambio de energía mejoran. La Fig. 6 compara los valores de la diferencia de temperatura salida-entrada del aire, para tres casos ensayados: a) tres tubos de cobre para la circulación del agua sin esponjas metálicas; b) tres tubos de cobre y dos esponjas metálicas; c) seis tubos de cobre y cuatro esponjas metálicas. Se observa que al variar del caudal del aire y del agua, la diferencia de temperatura salida-entrada del aire en el intercambiador es de aproximadamente 1°C para el caso a), de casi 5°C para el caso b) y hasta mayor de 6°C en el caso c). La disminución de la temperatura del agua en todos los casos no supera 1°C. En el caso del aire, los resultados anteriores permiten concluir que cuando se incorporan las esponjas metálicas, el fluido a contacto con estas recibe de manera más eficiente el calor y modifica mayormente su temperatura. En este caso las esponjas de cobre mejoran la transferencia de calor hacia el aire, que comúnmente representa el lado débil de estos dispositivos

[6]. En el caso del agua, que fluye en el interior de los tubos cilíndricos, la variación de su temperatura es muy reducida. Esto es consecuente con los mecanismos físicos de la transferencia de calor, ya que la capacidad térmica y la densidad del agua son mucho mayor que las del aire. Para suportar la consideración anterior, se brindan en la Fig. 7 y 8 los resultados de simulaciones computacionales [7] realizadas con el software COMSOL Multiphysics (COMSOL Inc., Burlington, MA, USA), asumiendo que en el intercambiador de calor compacto se alimenten dos fluidos de aire, uno frío a 300 K (26.85 °C) y el otro caliente a 312 K (38.85 °C), sustituyendo así el agua caliente. La Fig. 7 brinda el valor de la temperatura del aire caliente en la salida de dos tubos de cobre del intercambiador, en ambos casos muy cercana ahora a los 300 K, que es el valor mínimo alcanzable de esta configuración térmica. En cambio, la Fig. 8 traza la temperatura del aire caliente a lo largo del eje longitudinal del tubo de cobre, que disminuye desde 312 K a un valor próximo al mínimo de 300 K. Aunque el modelo computacional presente algunas simplificaciones, en particular asume que las paredes exteriores del intercambiador son adiabáticas y que las uniones de los materiales no crean resistencias térmicas adicionales, los resultados de Fig. 7 y 8 confirman que las propiedades físicas de los fluidos alimentados influyen directamente el desempeño del dispositivo.

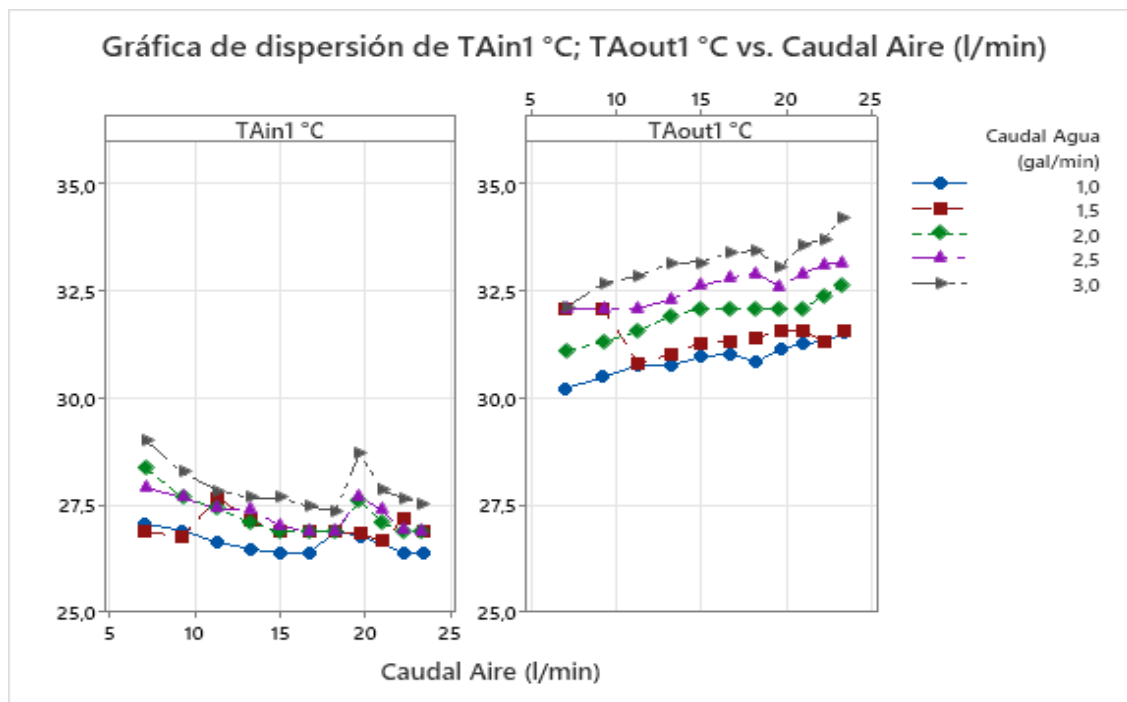
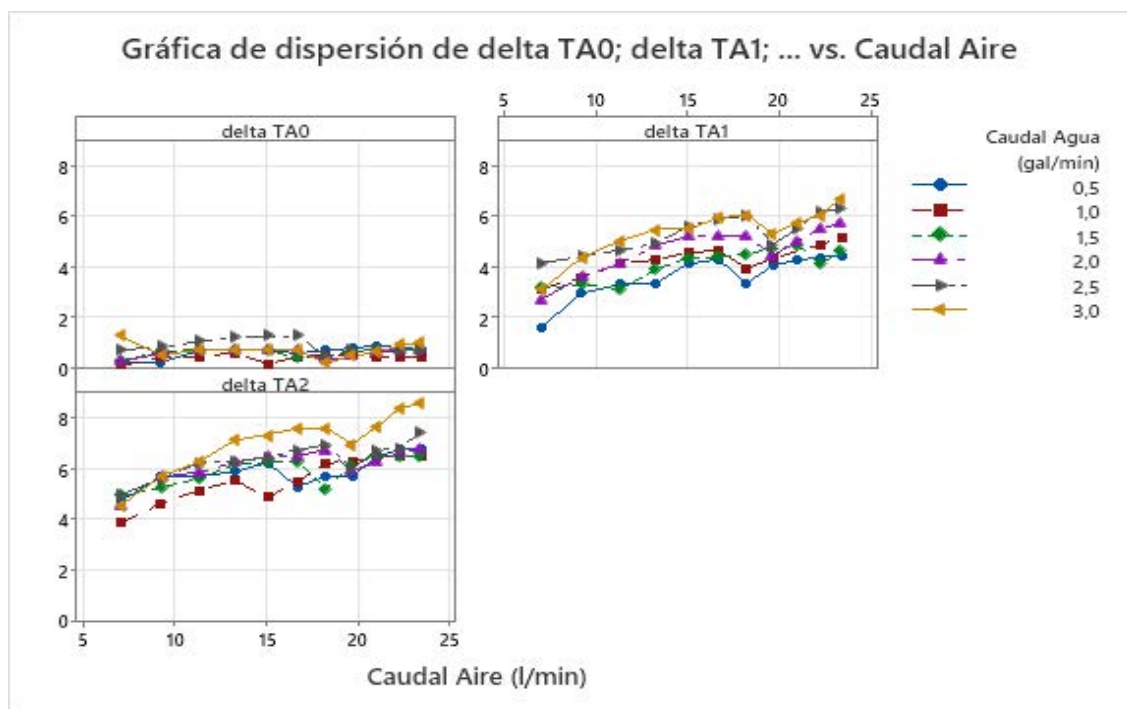
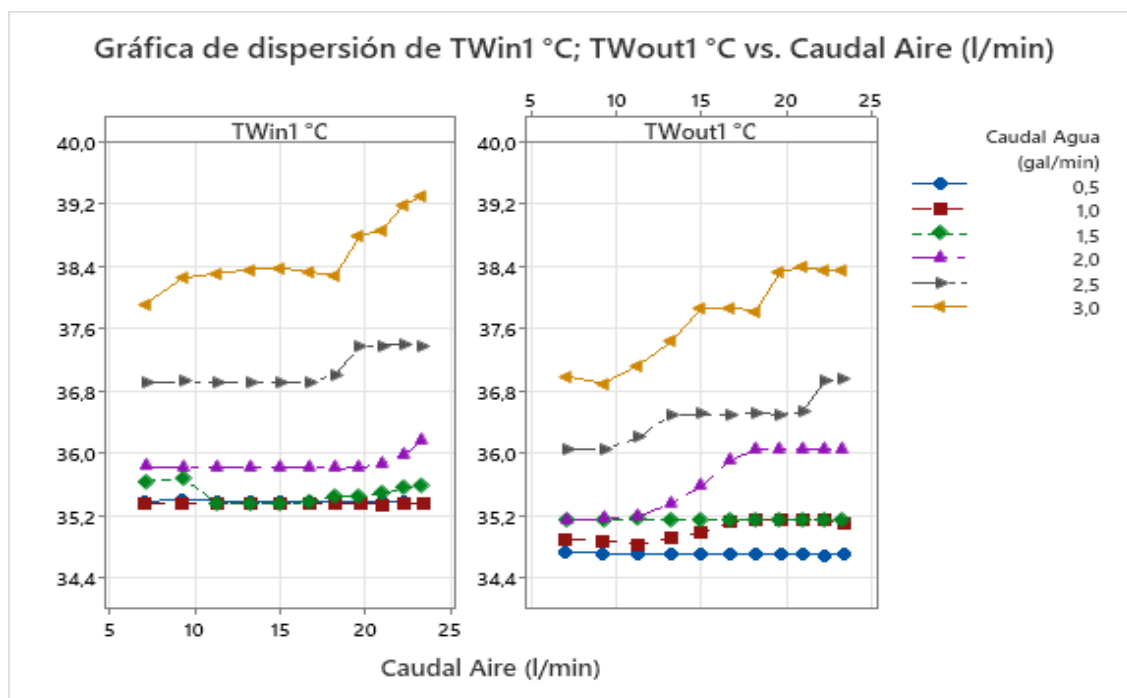


Fig. 4. a) Temperatura entrada aire (TAin1 en °C) y b) Temperatura salida aire (TAout1 en °C) versus el caudal de aire, para diferentes valores de caudal de agua. [5]



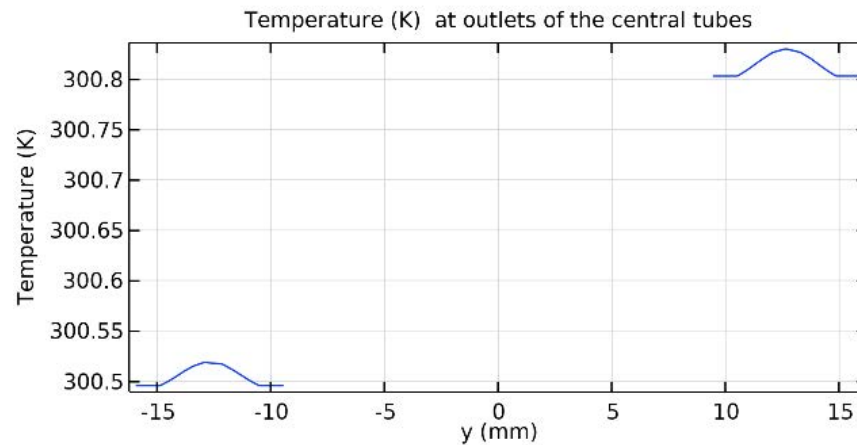


Fig. 7. Magnitud de la temperatura (grados K) del aire caliente en correspondencia de la salida de los dos tubos centrales e inferiores del intercambiador. Temperaturas de entrada: aire frío 300 K, aire caliente 312 K. [7]

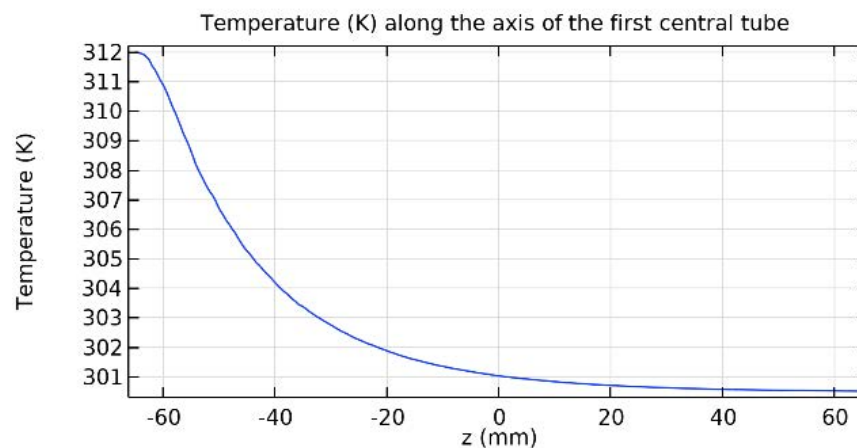


Fig. 8. Perfil axial de temperatura del aire caliente en el centro de un tubo del intercambiador. Temperaturas de entrada: aire frío 300 K, aire caliente 312 K. [7]

Conclusiones

Se ha diseñado y fabricado un intercambiador de calor compacto, introduciendo esponjas de cobre como superficies extendidas, para mejorar la transferencia de energía entre agua caliente y aire frío. Sucesivamente se ha desarrollado un circuito experimental de prueba y llevados a cabo experimentos de laboratorio para evaluar el desempeño térmico del sistema.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el intercambiador de calor compacto es efectivo en transferir energía hacia el aire frío, siendo que este fluido a contacto con las superficies extendidas de las esponjas recibe de manera eficiente el calor y cambia su temperatura. En el caso del agua caliente, que fluye en el interior de los tubos del intercambiador, la variación de la temperatura no es tan marcada. Lo anterior es consecuente con los mecanismos físicos de la transferencia de calor, ya que la capacidad térmica y la densidad del agua son mucho mayor que las del aire.

Para mejorar el desempeño del intercambiador de calor, en particular para reducir la temperatura del agua caliente en la salida, se prevé incorporar algunas modificaciones en el dispositivo. Algunas de

estas, que serán objeto de futuras actividades experimentales basadas en diseño de experimentos y de modelación computacional, son:

- a. aumentar la longitud de los tubos para la circulación del agua caliente, por ejemplo, creando un serpentín, que permita un recorrido más largo y por lo tanto un área de intercambio mayor;
- b. mantener el tamaño del intercambiador compacto, proveyendo un sistema de circulación del aire frío acorde a la solución indicada en a);
- c. reducir el espesor de pared de los pequeños tubos de cobre para la circulación del agua, facilitando el flujo de calor y por lo tanto contribuyendo a mejorar el sistema;
- d. sustituir la unión con pasta térmica, entre las esponjas y los tubos, con soldadura fuerte o braseado.

El presente estudio se ha enfocado solamente en aspectos básicos del intercambiador, otros factores a considerar, no analizados en este trabajo, podrían ser representados por los costos del dispositivo propuesto, la comparación con otras soluciones novedosas y alternativas, etc.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Vicerrectoría de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica, al personal docente, administrativo y técnico de la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial y de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección de Cambio Climático, "Costa Rica: Programa País de Carbono Neutralidad 2.0., Categoría Organizacional", 2019.
- [2] Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección de Cambio Climático, "Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica, 2022 – 2026", San José, Costa Rica, 2022.
- [3] Copper Foam | Duocel® Open Cell Foam Foam, Disponible: <https://ergaerospace.com/> [21/11/2024].
- [4] F. García-Moreno, "Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production", *Materials*, vol. 9, no. 2, p. 85, 2016, doi: 10.3390/MA9020085.
- [5] M. Morera A., "Diseño y construcción de una propuesta de intercambiador de calor compacto con materiales porosos", Proyecto Final de Graduación de Licenciatura en Ingeniería en Materiales, TEC, Cartago, 2024.
- [6] J. He y A. Jacobi, "Air-side heat transfer enhancement by a new winglet-type vortex generator array in a plain-fin round-tube heat exchanger", *Journal of Heat Transfer*, vol.132, 2010.
- [7] M. Guzman M, B. Chiné P., M. Conejo S. y F. Rodríguez M., "Desarrollo y evaluación de un dispositivo de intercambio térmico con esponja metálica como elemento de transferencia del calor", Informe final de proyecto de investigación, VIE-TEC, Cartago, 2024.

Sobre los autores:

Moises Morera-Alfaro

Estudiante graduado de la Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Bruno Chinè-Polito

Profesor de la Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Su formación académica es en el área de la ingeniería metalúrgica, con doctorado de la Universidad de Trieste (Italia) y sus intereses de investigación son en el área de los fenómenos de transporte computacional y experimental. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6966-5973>.

Francisco Rodríguez-Mendez

Profesor de la Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Su formación académica es en ingeniería electrónica con una Maestría en Ingeniería en Dispositivos Médicos del ITCR. Actualmente se encuentra finalizando sus estudios del Doctorado en Ingeniería del mismo ITCR, con tema de investigación en el campo de los materiales funcionales magnetocalóricos. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5870-2967>

Marcela Meneses-Guzmán

Profesora de la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Su formación académica es en el área de la ingeniería industrial, con doctorado del Politécnico de Milano (Italia) y sus intereses de investigación contemplan la estadística aplicada y mejora continua para la calidad. <https://orcid.org/0000-0001-5922-0145>.

Validación de una metodología para la optimización de la capacidad instalada en servicios de salud mediante simulación de eventos discretos

Felix Badilla-Murillo

Escuela de Ingeniería en Producción Industrial
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ fbadilla@itcr.ac.cr

Oscar Viquez-Acuña

Escuela de Ingeniería en Computación
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ oviquez@itcr.ac.cr

Resumen

En todo el mundo, los sistemas de salud enfrentan un gran desafío: atender a más personas con recursos limitados. Las largas filas, la falta de espacio o personal, y los tiempos de espera son señales de que algo necesita mejorar. Para lograrlo, es fundamental conocer y optimizar lo que se llama capacidad instalada, es decir, todo lo que un hospital o centro de salud tiene disponible para atender a los pacientes de forma eficiente: camas, personal, equipos, salas, etc.

Este proyecto de investigación explora una herramienta muy útil para lograrlo: la simulación de eventos discretos. Aunque suene complejo, se trata de una técnica que permite crear modelos digitales del funcionamiento de un hospital, como si fuera un videojuego, donde se puede ver cómo se mueven los pacientes, cómo trabaja el personal y qué ocurre si cambian algunas condiciones.

Gracias a esta simulación, se pueden probar diferentes escenarios sin afectar la atención real: ¿qué pasaría si se aumenta el número de enfermeros?, ¿y si se reorganizan las salas? Así, se pueden tomar mejores decisiones antes de aplicar cambios costosos o arriesgados.

La investigación incluye una revisión de estudios recientes publicados en revistas científicas de alto nivel, lo que refuerza la utilidad de esta técnica. Los hallazgos demuestran que la simulación es una herramienta poderosa para planificar, identificar problemas y proponer mejoras en los servicios de salud, con beneficios tanto para los pacientes como para el personal médico.

Palabras claves: Simulación, ingeniería de procesos, mejora continua, gestión hospitalaria

Abstract

Worldwide, health systems face a major challenge: providing care to more people with limited resources. Long queues, lack of space or staff, and prolonged waiting times are clear signs that something needs improvement. To achieve this, it's essential to understand and optimize what is known as installed capacity, that is, everything a hospital or healthcare facility has available to efficiently serve patients: beds, staff, equipment, rooms, etc.

This research project explores a highly effective tool to accomplish this: discrete event simulation. Although it may sound complex, it is a technique that enables creating digital models of hospital operations, similar to a video game, where one can observe patient movements, staff activities, and what happens when conditions change.

Thanks to this simulation, different scenarios can be tested without affecting real-world patient care: What would happen if the number of nurses increased? What if the rooms were reorganized? Thus, better decisions can be made before implementing costly or risky changes.

The research includes a review of recent studies published in high-level scientific journals, reinforcing the usefulness of this technique. Findings demonstrate that simulation is a powerful tool for planning, identifying issues, and proposing improvements in healthcare services, benefiting both patients and medical staff.

Keywords: Simulation, process engineering, continuous improvement, hospital management

Introducción

Hoy en día, acceder a un servicio de salud de calidad y en el momento oportuno se ha vuelto una preocupación común en muchas partes del mundo. Largas listas de espera, falta de personal médico, equipos insuficientes y procesos lentos afectan directamente la experiencia y el bienestar de los pacientes. Estos problemas no son casuales: reflejan una realidad compleja en la que los sistemas de salud ya sean públicos o privados, deben funcionar como un engranaje preciso compuesto por muchos elementos que dependen unos de otros [1].

Comprender cómo funciona este sistema en su conjunto es un gran reto para quienes administran hospitales o toman decisiones sobre políticas de salud. Para ello, se han desarrollado herramientas que permiten analizar el sistema desde distintos ángulos y simular cómo se comportaría ante ciertos cambios. Una de estas herramientas es la simulación, que permite crear modelos virtuales del sistema de salud para estudiar su comportamiento sin interrumpir el servicio real [2].

Cuando se habla de capacidad instalada en salud, nos referimos a los recursos disponibles para brindar atención: desde la infraestructura y los equipos, hasta el personal médico y el tipo de procedimientos que se realizan [3]. Una adecuada planificación de esta capacidad es esencial para evitar el colapso del sistema, asegurar la atención oportuna de los pacientes y, al mismo tiempo, mantener la sostenibilidad financiera del servicio [4][5].



Imágenes con fines ilustrativos generados con IA

No es un secreto que los servicios de salud públicos suelen estar más saturados que los privados, lo que genera listas de espera cada vez más largas y mayor insatisfacción entre los usuarios [6][7]. Aunque existen opciones como convenios entre el Estado y hospitales privados, la solución de fondo requiere una mejor gestión y uso de los recursos disponibles [8].

En este contexto, la simulación de eventos discretos y otros modelos como la simulación híbrida o el modelado basado en agentes se han convertido en aliados poderosos para planificar y tomar decisiones informadas [9]. Estos modelos permiten analizar, por ejemplo, cuánto tiempo espera un paciente, cómo se distribuyen los recursos en un hospital, o qué pasaría si se reorganiza el personal médico. Dependiendo del tipo de modelo (determinista o estocástico), se pueden obtener estimaciones más simples o realistas del funcionamiento del sistema [10].

Este artículo tiene como propósito explicar, de forma clara y comprensible, cómo estas herramientas de simulación pueden ayudar a mejorar los servicios de salud, reducir los tiempos de espera y ofrecer una atención más eficiente a las personas que más lo necesitan.

Metodología

Para este estudio se diseñó y aplicó una metodología basada en el enfoque DMAIC de Six Sigma, con el objetivo de analizar y mejorar la capacidad instalada en servicios de salud mediante simulación de eventos discretos. La metodología fue probada en tres unidades reales del sistema hospitalario costarricense: una sala de angiografía, un laboratorio de citologías y un servicio de patología encargado del procesamiento de biopsias.

Cada uno de estos servicios presentaba retos distintos en cuanto a tiempos de atención, utilización de recursos y listas de espera. La metodología permitió estudiar estos procesos en profundidad y proponer mejoras sostenibles, combinando el uso de herramientas estadísticas, entrevistas al personal y la simulación de procesos clínicos complejos.

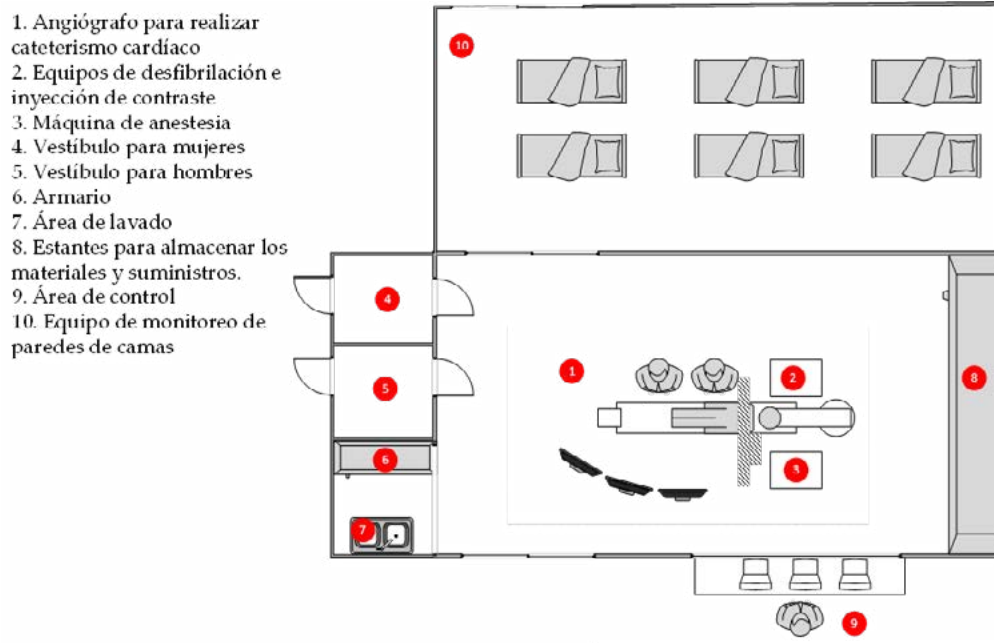


Figura 1: Sala de angiografía

La implementación se desarrolló a través de las siguientes etapas:

Definir: En cada uno de los tres servicios se identificó un problema operativo específico. Por ejemplo, en la sala de angiografía se abordó el exceso en los tiempos de espera por la alta demanda y complejidad de los procedimientos; en el laboratorio de citologías, se analizó la acumulación de muestras y su procesamiento; y en el servicio de patología, se estudió el retraso en la entrega de resultados de biopsias. Para definir los problemas se recurrió a entrevistas con el personal, análisis de la “voz del cliente” (pacientes y usuarios internos), y la elaboración de un Project Charter por unidad.

Medir: Se recopilaban datos cuantitativos y cualitativos en cada servicio, incluyendo tiempos de ciclo, tiempos de espera, número de casos procesados por día, y uso de recursos clave como equipos y personal. Además, se elaboraron mapas de proceso detallados. La información se analizó utilizando herramientas estadísticas descriptivas e inferenciales con el apoyo del software Minitab y el módulo Input Analyzer de Arena Simulation, ambos disponibles con licencia institucional en el Tecnológico de Costa Rica.

Analizar: A partir de los datos recolectados, se construyeron modelos de simulación de eventos discretos para cada uno de los tres servicios. Estos modelos permitieron reproducir virtualmente el comportamiento real de los procesos y fueron validados estadísticamente para confirmar que no existían diferencias significativas entre los resultados simulados y los datos reales. Esta etapa facilitó la identificación de cuellos de botella, sobrecargas de trabajo y momentos críticos en la atención.

Mejorar: Con los modelos validados, se realizaron análisis What-If, en los que se probaron distintos escenarios de mejora. Por ejemplo, se evaluaron alternativas como la redistribución del personal, cambios en los horarios de atención o el rediseño de flujos de trabajo. Las propuestas estuvieron inspiradas en principios del lean manufacturing, orientadas a reducir los tiempos de ciclo y mejorar la utilización de los recursos sin comprometer la calidad del servicio.

Controlar: Finalmente, se establecieron planes de seguimiento específicos para cada caso, incluyendo la definición de variables clave a monitorear, como la cantidad de casos procesados por semana, el tiempo de espera promedio y la carga de trabajo del personal. Estos planes permitieron asegurar que las mejoras implementadas pudieran mantenerse a lo largo del tiempo y servir como referencia para otros servicios similares.

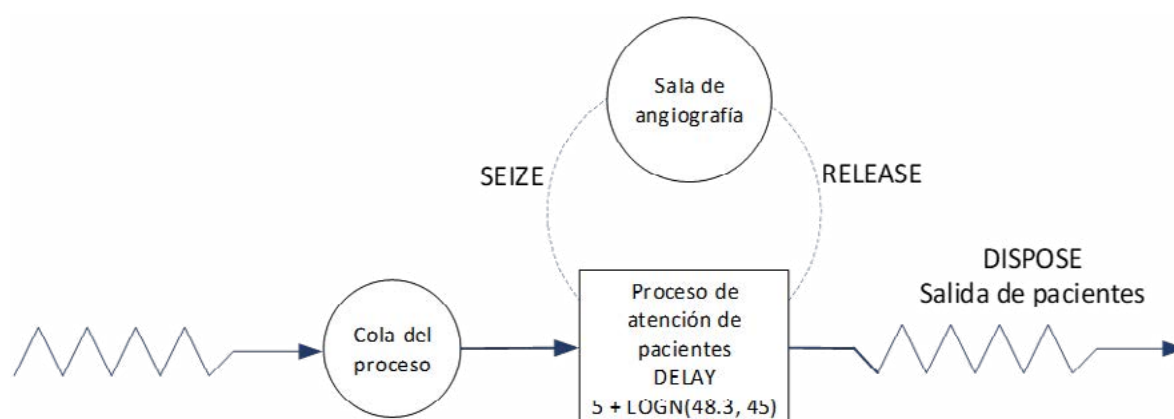


Figura 2: Modelo de simulación para la sala de angiografía

Resultados

Una vez aplicada la metodología fue posible evidenciar como los resultados obtenidos permitieron analizar en detalle el uso de los recursos en cada proceso y plantear escenarios de mejora realistas.

En la sala de angiografía, se determinó que la capacidad actual era insuficiente para atender la demanda, con una utilización cercana al 99%. Al simular un escenario donde se duplicaba la capacidad operativa, se logró reducir este indicador al 64%, lo que representa un uso más saludable de los recursos. Además, se comprobó que ofrecer un segundo turno de atención era una alternativa más rentable y rápida que construir una nueva sala, reduciendo considerablemente las listas de espera sin requerir grandes inversiones.

En el servicio de patología, se identificó un importante cuello de botella en el almacenamiento de las placas que esperan ser diagnosticadas. Con dos patólogos disponibles, el modelo indicó que era posible procesar cerca de 8000 biopsias por año, siempre que se incorporaran ajustes en la programación y distribución de tiempos. El análisis de los tiempos de diagnóstico reveló que las estimaciones previamente utilizadas por el centro (2,5 biopsias por hora) no eran realistas, y que existían dos grupos de complejidad distintos, lo que permitió mejorar la planificación de tareas.

En el laboratorio de citologías, se aplicaron principios de lean manufacturing como trabajar una muestra a la vez en lugar de hacerlo por lotes. Esta medida redujo en un 66% el tiempo de procesamiento (valor agregado) y en un 44% los tiempos de espera, lo que en conjunto representó una mejora del 65% en el tiempo total de ciclo. Además, la capacidad instalada del laboratorio prácticamente se triplicó.

En todos los casos, los modelos de simulación desarrollados fueron validados estadísticamente comparando sus resultados con los datos reales. Los intervalos de confianza indicaron que no existían diferencias significativas, lo que demuestra que los modelos son confiables y representativos de los procesos reales.

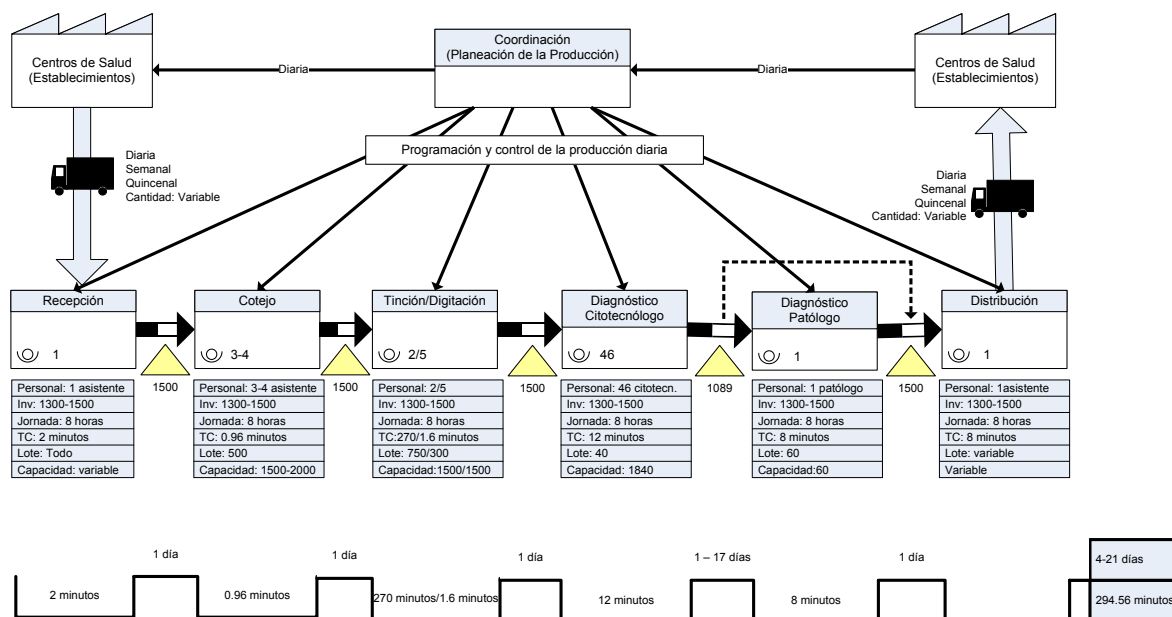


Figura 3: Mapa de flujo de valor para el laboratorio de citologías

Conclusiones

Este estudio demostró que la simulación de eventos discretos es una herramienta poderosa y accesible para mejorar los procesos en servicios de salud, al permitir analizar con detalle el comportamiento de sistemas complejos y proponer soluciones realistas antes de aplicarlas en la práctica.

El enfoque metodológico basado en DMAIC resultó especialmente útil para guiar el análisis en cada etapa: desde la identificación del problema hasta la implementación de mejoras y el diseño de estrategias de control. Combinado con principios de lean manufacturing, permitió reducir tiempos de espera, optimizar el uso de los recursos disponibles y aumentar la productividad de los servicios analizados.

La implementación de esta metodología en tres entornos distintos —una sala de procedimientos cardíacos, un laboratorio de citologías y un servicio de patología— demostró su versatilidad y eficacia. Además, el uso de herramientas como ARENA y modelos desarrollados en VBA Excel permitió adaptar el análisis a diferentes niveles de complejidad y disponibilidad tecnológica.

Entre las principales conclusiones destacan:

La simulación evitó inversiones innecesarias, como la construcción inmediata de nueva infraestructura, al identificar alternativas más rentables como la implementación de turnos adicionales.

Se identificaron cuellos de botella y falsas suposiciones en los tiempos de atención que afectaban la eficiencia del servicio.

Se generaron planes de control que permiten dar seguimiento a los indicadores clave y sostener las mejoras en el tiempo.

Finalmente, este estudio abre la puerta a nuevas investigaciones que integren esta metodología en otros servicios hospitalarios como urgencias, farmacia o consulta externa. También sugiere la posibilidad de incorporar tecnologías emergentes como inteligencia artificial y big data para reforzar los modelos predictivos en la gestión hospitalaria. Los resultados del estudio son presentados a las autoridades competentes mediante informes técnicos y sesiones de presentación orientadas a la toma de decisiones.



Imágenes con fines ilustrativos generados con IA

Referencias

- [1] F. Senkubuge, M. Modisenyane and T. Bishaw, "Strengthening health systems by health sector reforms," *Global Health Action*, vol. 7, pp. 1-7, 2014.
- [2] G Steigner, C. R. Doarn, M. Schuette, D. Matusiewicz and C. Thielscher, "Health Applications for Corporate Health Management," *Telemedicina and e-health*, vol. 23, no. 5, pp. 448-452, 2017.
- [1] G. Improta, G. Guizzi, C. Ricciardi, V. Giordano, A. M. Ponsiglione, G. Converso and M. Triasi, "Agile Six Sigma in Healthcare: Case Study at Santobono Pediatric Hospital," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, pp. 1-17, 2019.
- [4] M. Gómez-Chaparro, J. García-Sanz-Calcedo and J. Auni3n-Villa, "Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators," *Building Research and Information*, vol. 48, no. 5, pp. 526-537, 2020.
- [5] J. Auni3n-Villa, M. Gómez-Chaparro and J. García-Sanz-Calcedo, "Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals," *Expert Review of Medical Devices*, vol. 17, no. 8, pp. 855-865, 2020.
- [6] W. Chen, Z. G. Zhang and X. Chen, "On two-tier healthcare system under capacity constraint," *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 12, pp. 3744-3764, 2019.
- [7] A. Teymourifar, O. Kaya and G. Ozturk, "Contracting models for pricing and capacity decisions in healthcare systems," *Omega*, no. 102232, pp. 1-12, 2020.
- [8] J. Chu, X. Li and Z. Yuan, "Emergency medical resource allocation among hospitals with non-regressive production technology: a DEA-based approach," *Computers & Industrial Engineering*, pp. 1-42, 2022.
- [9] M. Alvarado, M. Lawley and Y. Li, "Healthcare simulation tutorial: methods, challenges and opportunities," in *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, Las Vegas, 2016.
- [10] N. Sweilam, S. AL-Mekhlafi, S. Hassan, N. Alsenaidh and A. Radwan, "Numerical treatments for some stochastic-deterministic chaotic systems," *Results in Physics*, vol. 38, no. 105628, pp. 1-12, 2022.

Sobre los autores

Felix Badilla-Murillo

Ingeniero Industrial, con grado de doctorado, profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Su trabajo académico e investigativo se centra en simulación industrial, análisis y optimización de procesos en servicios de salud, aplicación de inteligencia artificial en gestión logística y automatización industrial. Actualmente, desarrolla proyectos enfocados en la mejora continua mediante técnicas avanzadas de simulación y análisis de capacidad instalada. Su ORCID: [0000-0002-7632-594X](https://orcid.org/0000-0002-7632-594X)

Oscar Víquez-Acuña

Ingeniero en Computación, con grado de maestría, profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería en Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Su trabajo académico e investigativo se centra en temas variados de Ingeniería de Software. ORCID: [0009-0005-5776-5455](https://orcid.org/0009-0005-5776-5455)

Uso de bioestimulantes a base de microalgas en planes de manejo orgánico de papa (*Solanum tuberosum* L.)

Alessandra Le Roy-Cáceres

Estudiante Bachillerato en Biotecnología
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ a.leroy.1@estudiantec.cr

Francinie Murillo-Vega

Escuela de Biología
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ frmurillo@itcr.ac.cr

Fabián Villalta-Romero

Escuela de Biología
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ fvillalta@itcr.ac.cr

Pamela Jiménez-Montiel

Ingeniera en Biotecnología
Consultor Particular
✉ pamebio3340@gmail.com

Mattias Aguilera-Pogue

Estudiante Bachillerato en Biotecnología
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ m.aguilera.1@estudiantec.cr

Resumen

Las papas son un cultivo estratégico por su productividad y valor alimentario. En Costa Rica se cultivan principalmente en Cartago en los cantones de Oreamuno, Alvarado y Turrialba, y en menor medida en Zarcero de Alajuela mediante técnicas de manejo convencional que ha llevado a un uso excesivo de agroquímicos. Ante esto, el uso de bioestimulantes biológicos se presenta como una alternativa más sostenible. El Laboratorio de Microalgas ha desarrollado una línea de investigación y transferencia de tecnología en este tema y en colaboración con el INA e INTA, desarrolló un proyecto de extensión que consistió en la implementación de bioestimulantes elaborados con microalgas en el manejo orgánico del cultivo de papa, evaluando variables como la altura de las plantas y la producción de semillas en un sistema de maceteras. Los resultados indicaron una adecuada asimilación del bioestimulante, con una tendencia a mejorar la producción sin afectar negativamente el desarrollo de la planta. Además, el proyecto permitió fortalecer la colaboración con agricultores orgánicos y generar transferencia de un plan de manejo con los bioestimulantes microalgales y la semilla de papa orgánica producida a partir de los experimentos realizados en condiciones controladas en el TEC a las fincas participantes, marcando un paso hacia prácticas agrícolas más limpias.

Palabras clave: Agricultura orgánica; microalgas; papas; sostenibilidad

Abstract

Potatoes are a strategic crop due to their productivity and nutritional value. In Costa Rica, they are primarily cultivated in Cartago, in the cantons of Oreamuno, Alvarado and Turrialba; and to a lesser extent, in Zarcero, Alajuela. However, conventional management practices have led to the excessive use of agrochemicals. In response, the application of biological biostimulants has emerged as a more sustainable alternative. The Microalgae Laboratory has developed a research and technology transfer line on this topic and, in collaboration with INA and INTA, initiated an outreach project that involved implementing biostimulants produced from microalgae in the organic management of potato crops. This project evaluated variables such as plant height and seed production within a potted system. The results indicated adequate assimilation of the biostimulant, showing a tendency to enhance production without negatively affecting plant development. Additionally, the project fostered stronger collaboration with organic farmers and facilitated the transfer of a management plan, which integrated microalgae-based biostimulants and organic potato seed produced from controlled experiments at TEC, to the participating farms, representing a significant step toward cleaner agricultural practices.

Keywords: Organic agriculture; microalgae; potatoes; sustainability

Introducción

La papa es un cultivo fundamental en la dieta y economía de muchos países, incluidos los de América Latina. En Costa Rica, el 80% del cultivo se concentra en Cartago, seguido por Zarcero, en Alajuela. Estas regiones presentan las condiciones climáticas ideales para la producción de papa, razón por la cual muchas familias dependen de esta actividad para su sustento. Las zonas altas y la época lluviosa, que comprende los meses de mayo a octubre, ofrecen condiciones ideales para el desarrollo del cultivo debido a la mayor disponibilidad de agua, la humedad relativa adecuada y temperaturas frescas. Las lluvias moderadas favorecen la formación de tubérculos, mientras que las temperaturas suaves (entre 14 y 20 °C) ayudan a prevenir el estrés térmico y reducen la incidencia de enfermedades como el tizón tardío. No obstante, el cultivo intensivo ha implicado históricamente un alto uso de agroquímicos, especialmente por la susceptibilidad de la papa a plagas y enfermedades, y por la siembra en época seca que exige mayores insumos.

Debido al gran impacto ambiental del uso de fertilizantes y pesticidas, ha surgido como alternativa la agricultura orgánica: un sistema de producción que utiliza prácticas que protegen el medio ambiente y la salud humana, mediante el cultivo de productos libres de pesticidas sintéticos y fertilizantes químicos [1]. Para reemplazar los agroquímicos, dentro de los planes de manejo de papa orgánicos se utiliza el compost y organismos vivos depredadores para el control biológico de plagas y enfermedades.

El rendimiento de los cultivos orgánicos puede ser comparable al de los convencionales únicamente si los agricultores le dedican mucho esfuerzo [2], con planes de manejo adecuados, sin embargo, el rendimiento suele ser ligeramente inferior durante la implementación de prácticas sostenibles, debido al gran enfoque en la conservación del suelo [3]. Una vez que el suelo se enriquece con materia orgánica los rendimientos tienden a estabilizarse [4]. Por ende, la agricultura orgánica requiere de productos que logren aumentar el rendimiento del cultivo y a la vez preserven el entorno natural, como lo son los bioestimulantes. Un bioestimulante de microalgas promueve el crecimiento de la planta y la elongación de raíces, mejora la absorción y disponibilidad de nutrientes y aumenta la resistencia al estrés abiótico [5, 6].

El Laboratorio de Microalgas ha desarrollado investigación básica del uso de microalga como insumo agrícola [7,8], y desde el año 2017 gran parte del trabajo realizado es la comprensión del efecto de las microalgas activas en el suelo y en la planta. Así como el desarrollo de nuevos productos y la transferencia de esta información para educar a los agricultores en el uso de las tecnologías de bioestimulación con microalgas que se desarrollan a nivel internacional.

De esta forma, se gestó el primer proyecto de extensión en la línea agrícola del Laboratorio de Microalgas "Implementación de un plan de manejo con bioestimulantes de microalgas para la producción de

hortalizas” y parte del proyecto se centró en el desarrollo de un plan de manejo orgánico de papa que implementó un bioestimulante a base de microalgas, con el fin de mejorar la producción agrícola de forma amigable con el ambiente y así poder divulgar el conocimiento a los productores orgánicos de la provincia de Cartago, a través de la Asociación de productores orgánicos “Las Brumas”. Durante la investigación se buscó determinar el momento idóneo de aplicación del bioestimulante de microalgas, evaluar los planes de manejo de cultivo de papa de la Asociación las Brumas y la marca FERBA S.A, y evaluar el rendimiento del cultivo luego de la aplicación del bioestimulante de microalgas. Además, se contó con el apoyo del Instituto Nacional de Aprendizaje (INA) en el diseño del plan de manejo y el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) quién suministró la semilla para los experimentos.

Metodología

La investigación se realizó en el laboratorio y campo de microalgas del Centro de Investigación en Biotecnología del TEC, Cartago. Se trabajó con dos planes de manejo existentes: uno diseñado por la empresa FERBA Internacional y otro por el INA, transferido a productores de la Asociación Las Brumas.

Se sembró semilla pre básica de papa en 60 macetas con sustrato orgánico, ubicadas en una cuadrícula aleatoria de 5 filas x 12 columnas con un sistema de riego por goteo con una frecuencia de riego de dos veces por semana. Se emplearon dos variedades: *Palmira* (ensayo preliminar) y *Serrano* (ensayo final). A partir de los resultados preliminares, se ajustó la dosis de bioinsumos y el momento de aplicación del bioestimulante (Figura 1).

Se aplicaron cuatro tratamientos, cada uno con tres repeticiones:

1. Plan FERBA original (control), 2. Plan Las Brumas original (control), 3. Plan FERBA con bioestimulante de microalgas y 4. Plan Las Brumas con adición del bioestimulante

Para los dos ensayos, la primera aplicación del bioestimulante se realizó en la primera semana. Para el ensayo 1 la segunda aplicación se realizó en la semana 10 (durante la floración) y para el ensayo 2 en la semana 8 (una vez finalizada la floración).

	FERBA									
Palmira	Semana 1	Semana 2	Semana 3 y 4	Semana 5 y 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12 y 13
Serrano	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10
	Siembra	Emergencia		Tuberización			Floración			Maduración
Fertisul Zinc										
Progress Micro										
Stimplex (litros)										
Protifert K (litros)										
Protifert Mg (litros)										
Protifert Boro (litros)										
Naturcal (litros)										
Protifos K (litros)										
Naturam S (litros)										
	Las Brumas									
Palmira	Semana 0	Semana 1 y 2	Semana 3, 4 y 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8 y 9	Semana 10	Semana 11 y 12	Semana 13	Semana 14
Serrano	Semana 0	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
		Siembra y Emergencia		Tuberización			Floración			Maduración
Carbonato de calcio										
Compost										
Trichoderma										
Lactibacillus + Roca fosforica										
Chile + Ajo										
Biofermento (N,P,K, Mg,Zn)										
Apazote										
Bocashi										
Hidroxido de Ca+Mg										
MS										
Abono de frutas (K,B)										

Figura 1. Cronograma de aplicación de insumos según semanas y etapas de desarrollo de la papa para ambas variedades y planes de manejo. Fuente: propia

Las variables medidas incluyeron altura de plantas, rendimiento (peso y número de tubérculos), calidad (tamaño y peso promedio), y pH del suelo (Figura 2). Se aplicaron análisis estadísticos (ANOVA y Kruskal-Wallis) para evaluar diferencias significativas.

Finalmente, se organizó un taller con productores de la Asociación Las Brumas, para divulgar resultados y entregar semilla orgánica producida en el proyecto.



Figura 2. Izquierda: El investigador del CIB, Dr. Fabián Villalta, realizando las mediciones de los tubérculos de papa. Derecha: La Ingeniera en Biotecnología, Pamela Jiménez realizando cosecha de las papas del sistema experimental en maceteras, en ese entonces durante el desarrollo de TFG. Fuente: propia

Resultados

Para el primer ensayo, realizado con la variedad de papa *Palmira*, el pH del suelo fue de 5,7 y para el segundo ensayo, con papa Serrano, fue de 6,3, por lo que en ambos casos el pH se mantuvo dentro del rango óptimo (entre 5,5 y 7), lo cual favorece la disponibilidad de los nutrientes esenciales para el desarrollo de la papa.

En relación con la altura de las plantas, en ambos ensayos el análisis estadístico no determinó diferencias significativas en el crecimiento del cultivo entre los cuatro tratamientos. Esto indica que el bioestimulante no genera un impacto negativo sobre el crecimiento vertical, lo cual es un resultado deseado, ya que su aplicación no desvió recursos destinados al desarrollo de los tubérculos. Esta observación sugiere que los momentos ideales para aplicar el bioestimulante son durante la siembra y al final de la floración, ya que son etapas en las que el producto podría incidir positivamente en la fisiología de la planta sin afectar su arquitectura vegetativa (Figura3).

Con respecto al rendimiento, los resultados de los ensayos 1 y 2 muestran variaciones en la suma total y en el promedio del peso de los tubérculos, según los diferentes tratamientos aplicados. La suma total de peso de los tratamientos con el bioestimulante de microalgas tendió a ser mayor, lo cual se traduce en una mayor producción de semillas de papa orgánica. Además, como tendencia general, los tratamientos que incluyeron el bioestimulante de microalgas produjeron tubérculos con un mayor peso promedio, por lo que se evidencia una mejora en el crecimiento individual.



Figura 3. Resumen gráfico del proyecto y sus principales resultados. Fuente: propia

Referente al primer ensayo, el plan de manejo FERBA mostró mayor tendencias en rendimiento de peso promedio del tubérculo, respecto al plan usado por la Asociación Las Brumas (propuesto por el INA), lo que condujo a realizar ajustes a este último plan de manejo para lograr una mejor respuesta al bioestimulante, esta mejora se observó en el segundo experimento, siendo muy similares los resultados de rendimiento obtenido en ambos planes de manejo cuando se aplican las microalgas. De esta forma, se demuestra un ligero impacto positivo del bioestimulante en la producción y calidad de la semilla de papa. No obstante, la prueba estadística ANOVA no mostró diferencias significativas, por lo cual las mejoras observadas se interpretan como una tendencia positiva más que como un efecto estadísticamente comprobado (Figura 4 y 5). Estos resultados respaldan la necesidad de continuar la investigación en condiciones más representativas del cultivo de papa en el país, como lo serían parcelas de producción a campo abierto.

La ausencia de diferencias significativas al realizar las pruebas estadísticas ANOVA y Kruskal-Wallis sugiere que otros factores importantes en el manejo del cultivo pueden estar influyendo sobre el rendimiento. En el contexto de este proyecto, estos factores podrían ser la altitud, la temperatura y la limitación espacial que presentan las macetas utilizadas. La altitud y la temperatura son variables críticas para el crecimiento y desarrollo de las plantas; durante la realización del proyecto, la región de Cartago experimentó temperaturas elevadas, lo que pudo haber impactado los resultados, puesto que la papa prospera en climas frescos. A su vez, las macetas utilizadas como sistema experimental pudieron haber restringido el desarrollo radicular, limitando la absorción de agua y nutrientes. Por estas razones, se sugiere realizar una réplica del experimento en parcelas abiertas y en una zona con temperaturas más bajas.

Es importante mencionar que se han realizado estudios similares con bioestimulantes de microalgas, en los cuales también se han observado mejoras en la cantidad y peso de los tubérculos producidos. Un ejemplo notable es el estudio realizado por Castro et al. (2023), el cual reportó un aumento del 20,77% en la cantidad de tubérculos en comparación con el tratamiento control [9].

Finalmente, el aumento en la dosis de bioinsumos y modificación del momento de aplicación del bioestimulante para el segundo ensayo (Figura 5), resultaron provechosos para la nutrición de las plantas. Cabe recalcar que los bioestimulantes tienen un efecto positivo en la salud vegetal, lo cual

ha sido demostrado en investigaciones semejantes, donde las mediciones de clorofila realizadas en grupos tratados con bioestimulante presentaron niveles altos de este pigmento. Estos resultados indican plantas sanas, sin deficiencias de nitrógeno, lo cual es un indicio indirecto del buen estado fisiológico general de los cultivos [5, 6].

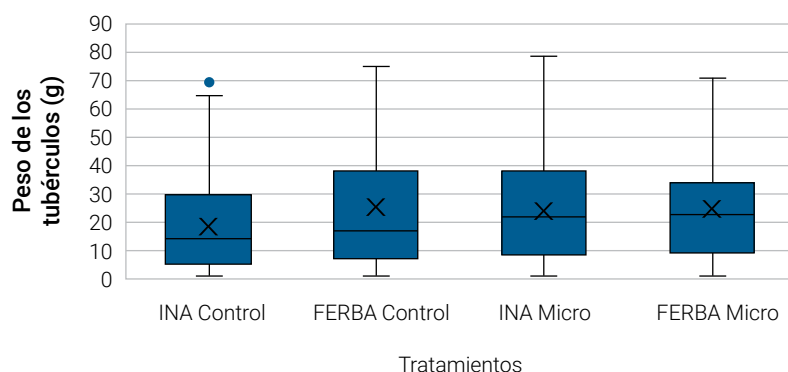


Figura 4. Peso de tubérculos de papa *Palmira* en diferentes tratamientos. Fuente: propia

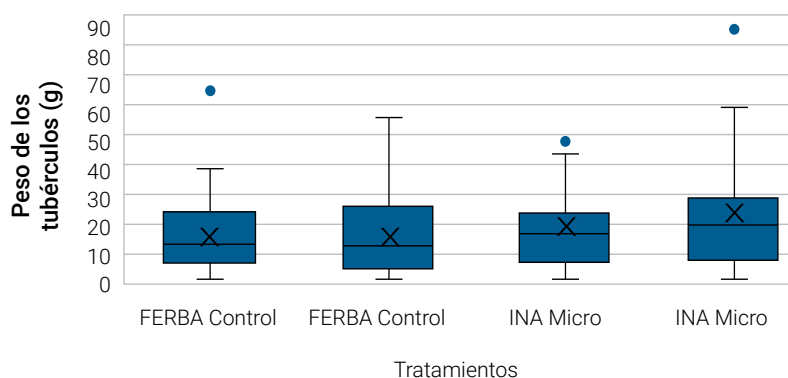


Figura 5. Análisis del peso de tubérculos de papa *Serrano* en diferentes tratamientos. Fuente: propia

Tras la impartición del primer taller para la educación de los productores orgánicos, se obtuvo una adecuada recepción de la información; se contó con un 50% de participación femenina, lo cual impulsa una difusión equitativa del conocimiento a nivel de género. Con los productores se compartió la semilla de papa orgánica generada tras los experimentos (Figura 6), la cual fue bien recibida, dado que en la provincia de Cartago existe una baja disponibilidad de semilla de papa orgánica.



Figura 6. Taller de Divulgación sobre Bioestimulación con Microalgas, dirigido a los agricultores orgánicos de la Asociación de Agricultores Orgánicos “Las Brumas”. A) Charla magistral por parte del Dr. Fabian Villalta, coordinador del proyecto; B) Agricultores participantes recibiendo la semilla de papa transferida desde el proyecto. Fuente: propia

Conclusiones

El uso de bioestimulantes de microalgas en el cultivo de papa mostró tendencia al aumento en el rendimiento y calidad de las semillas, particularmente en el plan de manejo de FERBA, lo que indica que el uso de bioestimulante de microalgas puede llegar a mejorar la producción en los cultivos de papa y reemplazar otros bioestimulantes a base de algas que a menudo son importados a Costa Rica. Aunque no se observaron diferencias significativas a nivel estadístico, sí hubo tendencias positivas que justifican una segunda fase en parcelas reales y con condiciones climáticas adecuadas, para conocer la efectividad del bioestimulante en situaciones más representativas a las zonas agrícolas.

La colaboración activa con asociaciones de agricultores y empresas como FERBA S.A. fue clave para el desarrollo del proyecto, permitiendo validar el potencial del Laboratorio de Microalgas como un aliado estratégico en la transición hacia una agricultura más sostenible, local e inclusiva.

Bibliografía

- [1] FAO, "Agricultura orgánica, ambiente y seguridad alimentaria," p. 280, 2003, Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/005/Y4137S/y4137s03.htm#bm03>
- [2] C. Kremen, "Agricultura Orgánica vs Agricultura Convencional: Comparación del rendimiento productivo - Revista InfoAgro México." Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: <https://mexico.infoagro.com/agricultura-organica-vs-agricultura-convencional-comparacion-del-rendimiento-productivo/>
- [3] S. Marín, F. Bertsch, and L. Castro, "Efecto del manejo orgánico y convencional sobre propiedades bioquímicas de un andisol y el cultivo de papa en invernadero," *Agronomía Costarricense*, vol. 42, no. 2, pp. 27–46, 2017.
- [4] J. Pucci, "Los rendimientos de la agricultura orgánica se quedan cortos - AgriBusiness Global." Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.agribusinessglobal.com/es/mercados/los-rendimientos-de-la-agricultura-organica-se-quedan-cortos/>
- [5] S. Araujo-Abad and Y. Collahuazo-Reinoso, "Producción de Biofertilizantes a Partir de Microalgas," *CEDAMAZ*, vol. 9, no. 2, pp. 81–87, Dec. 2019, Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/648>
- [6] A. M. Miranda, F. Hernandez-Tenorio, F. Villalta, G. J. Vargas, and A. A. Sáez, "Advances in the Development of Biofertilizers and Biostimulants from Microalgae," *Biology*, vol. 13, no. 3, pp. 1–19, 2024, doi: 10.3390/biology13030199.
- [7] F. Villalta-Romero, F. Murillo-Vega, B. Martínez-Gutiérrez-, J. Valverde-Cerdas, A. Sánchez-Kopper, and M. Guerrero-Barrantes, "Microalgal biotechnology in Costa Rica : Business opportunities to the national productive sector Biotecnología microalgal en Costa Rica : Oportunidades de negocio para el sector productivo nacional," *Tecnología en Marcha*, vol. 32, pp. 85–93, 2019.
- [8] F. Murillo-Vega, M. Faith-Vargas, M. Chicas-Romero, K. Meneses-Montero, and F. Villalta-Romero, "Advances in microalgal biotechnology in Costa Rica: contributions from the Costa Rica Institute of Technology," *Revista Tecnología en Marcha*, Nov. 2024, doi: 10.18845/tm.v37i9.7609.
- [9] M. Castro Tarín, Y. K. Padilla-Valle, G. Ulloa-Mercado, M. A. Gutiérrez-Coronado, A. Verdugo-Fuentes, A. Rentiera-Meixia, P. Gortarez-Moroyoqui, y M. Díaz-Tenorio, "Respuesta agronómica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) a la aplicación de un bioestimulante a base de *Chlorella sorokiniana*," [Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), México]. Póster presentado en el XII Congreso Internacional de SOFILAC, San José, Costa Rica, 18–22 de noviembre de 2024.

Sobre los autores:

Pamela Jiménez-Montiel

Ingeniera en Biotecnología, graduada del Instituto tecnológico de Costa Rica, actualmente labora como consultor particular.

Alessandra Le Roy-Cáceres

Estudiante del Bachillerato en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Mattias Aguilera-Pogue

Estudiante del Bachillerato en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

Francinie Murillo-Vega

Ingeniera en Biotecnología, profesora e investigadora, labora par la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2751-8390>

Fabián Villalta-Romero

Doctor en Química, profesor e investigador de la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7484-8125>

EVEPRIM: Recursos Educativos Abiertos para la Enseñanza de la Matemática en la Educación Primaria de Costa Rica

Luis Gerardo Meza-Cascante

Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ gemeza@itcr.ac.cr

Carlos Monge-Madriz

Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ camonge@itcr.ac.cr

Reiman Acuña-Chacón

Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ reiacuna@itcr.ac.cr

Zuleyka Suárez-Valdés-Ayala

Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ zsuarez@itcr.ac.cr

Rebeca Solís-Ortega

Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ rsolis@itcr.ac.cr

Ivonne Sánchez-Fernández

Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ ivsanchez@itcr.ac.cr

Resumen

Bajo el nombre genérico de Proyecto EVEPRIM (Educación Virtual para Estudiantes de Primaria), la Escuela de Matemática del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) ha desarrollado una serie de proyectos de extensión (EVEPRIM 6, EVEPRIM 3, EVEPRIM 3.1, EVEPRIM 3.2 y EVEPRIM 6.1) enfocados en la creación de Recursos Educativos Abiertos (REA) para fortalecer la enseñanza de la matemática en la educación primaria costarricense. Mediante materiales digitales, videos educativos y aplicaciones interactivas, EVEPRIM busca mejorar el aprendizaje matemático y fomentar el acceso equitativo a recursos de calidad. En este artículo se contextualiza el proyecto y se presentan los principales resultados obtenidos hasta la fecha.

Palabras clave: recurso educativo abierto, educación primaria, educación matemática, material interactivo, tecnología educativa.

Abstract

Under the generic name of the EVEPRIM Project (Virtual Education for Primary Students), the School of Mathematics at the Costa Rica Institute of Technology (ITCR) has developed a series of extension projects (EVEPRIM 6, EVEPRIM 3, EVEPRIM 3.1, EVEPRIM 3.2, and EVEPRIM 6.1) focused on creating Open Educational Resources (OER) to strengthen mathematics teaching in Costa Rican primary education. Through digital materials, educational videos, and interactive applications, EVEPRIM aims to improve mathematical learning and promote equitable access to high-quality resources. This article provides a contextualization of the project and presents the main results obtained to date.

Keywords: open educational resource, primary education, mathematics education, interactive material, educational technology.

Introducción

La educación primaria en Costa Rica se ha visto afectada por eventos disruptivos como las huelgas docentes de 2018 y 2019, así como por la pandemia de COVID-19, lo que ha generado un “apagón educativo” [1], [2]. Además, en pruebas estandarizadas internacionales, Costa Rica ha presentado resultados inferiores al promedio de los países de la OCDE en matemática, y los informes de 2023 señalan un deterioro en las tres áreas evaluadas [3]. Estudios también han evidenciado que las personas docentes enfrentan dificultades para implementar estrategias de enseñanza alineadas con las habilidades establecidas en los programas de matemáticas [4].

En este contexto, el proyecto EVEPRIM se diseñó con el objetivo de desarrollar materiales educativos bajo la figura de Recursos Educativos Abiertos (REA), en concordancia con los programas de matemática aprobados por el Consejo Superior de Educación en 2012 [5]. Los REA incluyen una variedad de materiales, como libros digitales, videos y aplicaciones tecnológicas, que han demostrado ser valiosos elementos para enriquecer el aprendizaje de las matemáticas en la educación primaria [6].

EVEPRIM se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular con la meta 4.1 del ODS 4 sobre educación de calidad. Asimismo, se fundamenta en la Ley de Promoción del Desarrollo Científico y Tecnológico (Ley 7169), que establece como prioridad el mejoramiento de la enseñanza de la matemática [7] y tiene asidero en el “Modelo Académico” del ITCR y en el eje de conocimiento estratégico denominado “Educación”.

Metodología

La metodología seguida en el desarrollo de los REA dentro del proyecto EVEPRIM, concordante en términos generales con la indicada en [6], consta de siete etapas:

1. **Identificación de conocimientos y habilidades:** Se analizan los programas de matemática vigentes para determinar los contenidos y habilidades específicas a desarrollar.
2. **Diseño, grabación y edición de materiales audiovisuales:** Se elaboran videos educativos validados por expertos y subtitulados para accesibilidad.
3. **Creación de aplicaciones tecnológicas:** Se diseñan juegos, cuestionarios y actividades interactivas para reforzar el aprendizaje.
4. **Diseño de libros interactivos:** Se estructuran en secciones como activación de conocimientos, videos, ejercicios prácticos y aplicaciones tecnológicas.
5. **Validación del REA diseñado:** Se realiza un proceso de revisión por extensionistas, estudiantes y docentes para asegurar su pertinencia.
6. **Validación con docentes de primaria:** Se aplica un cuestionario a docentes seleccionados con apoyo del Ministerio de Educación Pública (MEP).
7. **Publicación y divulgación de resultados:** Los materiales se publican en el sitio web del ITCR y el portal EDUCATICO del MEP.

Resultados

Se han desarrollado diversos proyectos bajo EVEPRIM ((EVEPRIM 6, EVEPRIM 3, EVEPRIM 3.1, EVEPRIM 3.2 y actualmente está en desarrollo EVEPRIM 6.1), generando libros digitales, folletos de práctica imprimibles y videos descargables para los temas de “Estadística y Probabilidad”, “Relaciones y Álgebra”, “Geometría” y “Medidas” en tercer año, así como “Números” y “Relaciones y Álgebra” en sexto año. Estos materiales están disponibles en: <https://www.tec.ac.cr/eveprim>.

Cada uno de estos materiales se alinea con el programa vigente de matemática [5] y cubre todas las habilidades y contenidos de las áreas desarrolladas.

Además, cada libro cuenta con secciones que enriquecen los contenidos abarcados a saber:

1. Conocimientos previos: En estos apartados se refuerzan contenidos de los dos años anteriores y que se requieren para introducir los nuevos aprendizajes.
2. Recuerda que... Se refiere a conocimientos puntuales que se requieren para lograr la comprensión de la explicación de un aspecto teórico, un ejemplo o la solución de un ejercicio.
3. Para saber más... Se presentan conocimientos avanzados de los temas. Son secciones orientadas a estudiantes que quieran profundizar en los contenidos.
4. Sabías que... Esta sección remite a datos curiosos, hechos históricos o aplicaciones de la matemática en la vida cotidiana. Con ellas se pretende estimular el eje disciplinar que pide el programa: "La potenciación de actitudes y creencias positivas en torno a la matemática".
5. Videos: Esta sección permite, mediante videos, la explicación de un tema introductorio, la solución gráfica de un ejercicio o ejemplo y el refuerzo de aspectos teóricos. Cabe destacar que cada uno de los videos ha sido subtítuloado para atender a la población que presente algún tipo de deficiencia auditiva.
6. Práctica: Esta sección contiene problemas, ejercicios, retos y autoevaluaciones. Cada ejercicio remite a un apartado donde se explica la solución detallada de cada uno.
7. Aplicaciones tecnológicas: Esta sección contiene enlaces a las aplicaciones tecnológicas diseñadas para reforzar el eje disciplinar de "uso inteligente y visionario de tecnologías digitales".

Discusión

El Proyecto EVEPRIM ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la enseñanza de la matemática en Costa Rica en la educación primaria. Su enfoque en REA promueve el acceso equitativo a materiales de calidad y fomenta el uso de tecnología educativa. Los resultados obtenidos justifican la continuidad del proyecto hasta abarcar la totalidad del programa de matemáticas de la educación primaria costarricense.

Referencias

- [1] W. Jiménez y D. Chavarría, "Consecuencias de la pandemia en el cumplimiento de las recomendaciones de la OCDE," MEP, 2022. [Online]. <https://www.mep.go.cr/sites/default/files/2023-10/ocde-deie-2022.pdf>
- [2] Programa Estado de la Nación, "Octavo Estado de la Educación," 2021.
- [3] OCDE, "Educación en Costa Rica: Aspectos Destacados 2017," 2017. [Online]. Available: <https://www.rectoria.ucr.ac.cr/site/wp-content/uploads/2017/08/aspectosdestacados-2017.pdf>
- [4] J. Espeleta, A. Fonseca y W. Zamora, "Estrategias didácticas para la enseñanza y el aprendizaje de la Matemática," Repositorio INIE, 2016.
- [5] MEP, "Programas de Matemática para la Educación Primaria," 2012.
- [6] M. Ramírez, E. Celi y I. Lligüan, "Recursos educativos abiertos en el proceso de enseñanza aprendizaje," *Int. J. New Educ.*, no. 9, 2022
- [7] Asamblea Legislativa. Ley 7169. (11 de mayo 2021). http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=11908.

Sobre los autores

Luis Gerardo Meza-Cascante

Profesor catedrático e investigador consolidado 1, Escuela de Matemática, Campus Tecnológico Central Cartago. <https://orcid.org/0000-0002-5413-0172>

Zuleyka Suárez-Valdés-Ayala

Profesora catedrática e investigadora consolidada 1, Escuela de Matemática, Campus Tecnológico Central Cartago. <https://orcid.org/0000-0002-1822-4825>

Carlos Monge-Madriz

Profesor titular intermedio asociado, Escuela de Matemática, Campus Tecnológico Central Cartago. <https://orcid.org/0000-0002-5148-2797>

Rebeca Solís-Ortega

Profesora, Intermedio Profesora Catedrática, Escuela de Matemática, Campus Tecnológico Central Cartago. <https://orcid.org/0000-0002-3065-8386>

Reiman Acuña-Chacón

Profesor catedrático, Escuela de Matemática, Campus Tecnológico Central Cartago. <https://orcid.org/0000-0002-0094-3282>

Ivonne Sánchez-Fernández

Profesora, Intermedio Profesora Asociada, Escuela de Matemática, Campus Tecnológico Central Cartago. <https://orcid.org/0000-0002-7346-766X>

Análisis del Límite Técnico en la Integración de Energías Renovables y Generación Distribuida en las Redes Eléctricas de Costa Rica

Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez

Escuela de Ingeniería Electromecánica
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ ggomez@itcr.ac.cr

Rebeca Solís-Ortega

Escuela de Matemática
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ rsolis@itcr.ac.cr

Resumen

La integración de generación distribuida en el sistema eléctrico de Costa Rica plantea desafíos técnicos y operativos que requieren una planificación estratégica. Este estudio se enmarca en el proyecto de investigación titulado *Estimación del límite técnico permisible para la penetración de energías renovables y generación distribuida en el sistema eléctrico*, desarrollado durante el período 2023-2024 por la Escuela de Ingeniería Electromecánica y la Escuela de Matemática del Tecnológico de Costa Rica. La iniciativa tuvo como objetivo principal analizar la viabilidad técnica de una mayor integración de fuentes renovables y generación distribuida en redes eléctricas existentes, mediante herramientas de simulación, modelado matemático y análisis de estabilidad operativa. Se identificaron problemas relacionados con la calidad de datos en la evaluación de demanda y pérdidas, así como el riesgo de sobretensiones y sobrecargas en redes de distribución con alta penetración solar. Además, se evaluó el papel de los Sistemas de Almacenamiento de Energía por Baterías (BEES, por sus siglas en Inglés), en la mitigación de contingencias y en la optimización del sistema de transmisión. Con base en estos hallazgos, se propone una hoja de ruta estructurada en cuatro fases para robustecer la resiliencia del sistema eléctrico costarricense; optimizar la integración de energías renovables y garantizar una transición sostenible hacia una red más inteligente y eficiente.

Palabras claves: generación distribuida, transmisión, distribución, sistemas flexibles, recursos distribuidos.

Abstract

The addition of distributed generation into the Costa Rican electricity system presents technological and operational obstacles necessitating strategic planning. The present research examines the effects of integrating intermittent renewable energy resources and electrochemical storage system devices on grid stability and efficiency. Issues with data quality in evaluating demand and losses were recognized, along with the potential of overvoltages and overloads in distribution networks with significant solar integration. The function of Battery Energy Storage Systems (BESS) in contingency mitigation and transmission system optimization was assessed. A four-phase roadmap is proposed to enhance the resilience of the Costa Rican electricity system, maximize the integration of renewable energy sources, and facilitate a sustainable transition towards a more intelligent and efficient grid.

Keywords: distributed generation, transmission, distribution, flexible systems, distributed resources.

Introducción

Costa Rica ha sido reconocida a nivel mundial por su compromiso con la sostenibilidad y la generación de energía renovable [1]. Sin embargo, la creciente penetración de fuentes renovables intermitentes, como la solar y eólica, junto con la generación distribuida (GD), plantea desafíos técnicos en la operación y planificación del sistema eléctrico. Entre estos desafíos se incluyen la gestión de la demanda, la estabilidad de la red y la capacidad de integración de nuevas tecnologías [2].

Para abordar estos retos, el modelado de las redes eléctricas juega un papel importante, ya que permite evaluar distintos escenarios para analizar la operación del sistema. Este proceso requiere herramientas de simulación estables, robustas y confiables [3]. La selección del software adecuado depende del tipo de red analizada. Por ejemplo, en sistemas de transmisión, programas como ETAP® y PSS/E® se han utilizado para estudios de la Red Eléctrica de Centroamérica, para evaluar el comportamiento del sistema [4], [5]. Por otro lado, el análisis de redes de distribución se realiza con plataformas como ETAP, DIgSILENT, NEPLAN y CYME, cada una con aplicaciones específicas según las necesidades del estudio [3][7].

En el contexto costarricense, estas herramientas permiten comprender cómo el avance hacia el uso de energías renovables y la distribución local de electricidad pueden afectar el Sistema Eléctrico Nacional. Este trabajo no solo contribuye al análisis de la planificación y gestión sostenible del sistema, sino que también busca ofrecer una visión clara de sus capacidades actuales y los ajustes necesarios para mantener su confiabilidad ante el aumento de fuentes renovables. Como resultado, se propondrá una hoja de ruta para la integración de la generación distribuida al Sistema Eléctrico de Potencia de Costa Rica, asegurando una transición sostenible y eficiente que maximice el aprovechamiento de las energías renovables sin comprometer la estabilidad del sistema.

Método

El impacto de la generación distribuida (GD) y los sistemas de almacenamiento electroquímico en redes eléctricas fue evaluado mediante simulaciones y técnicas de optimización, basadas en estudios realizados en redes de distribución de Costa Rica y en la red de transmisión de SIEPAC (Sistema de Interconexión Eléctrica de los países de América Central), usando ETAP® con el fin de modelar la respuesta del sistema ante contingencias, evaluar la estabilidad de frecuencia, tensión y flujos de potencia.

En primer lugar, se modeló una red de distribución de media tensión en Costa Rica, compuesta por 634 cargas residenciales, 102 transformadores y 239 nodos, utilizando datos de una empresa eléctrica regional. Este modelo permitió analizar perfiles de tensión, sobrecargas y pérdidas bajo dos escenarios: uno con información detallada de medidores inteligentes y otro con datos agregados en la alimentación del circuito. Las simulaciones se realizaron en intervalos de 15 minutos durante siete días. Adicionalmente, se examinó el impacto de la penetración fotovoltaica en la red, considerando niveles de integración del 0% al 100%, con base en datos de irradiancia y temperatura provenientes de la Base de Datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB), utilizando patrones típicos de generación solar para la región [6], [7].

Seguidamente se modeló una red de transmisión de Centroamérica ya que el sistema eléctrico de Costa Rica se encuentra interconectado con los países de la región, donde se desarrolló un modelo de optimización por etapas para determinar la ubicación y dimensionamiento óptimos de los BESS. Este enfoque combinó criterios económicos, tales como precios nodales y costos de transferencia de energía, con simulaciones dinámicas que garantizaron un análisis integral del sistema. Además, se implementó un mecanismo de detección de desbalances entre generación y demanda, permitiendo la activación del almacenamiento electroquímico en situaciones críticas, optimizando así la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico [5], [4]. Este análisis incluyó la evaluación de la gestión de la demanda, la reducción de pérdidas y la optimización de costos operativos, considerando tanto aspectos técnicos como económicos [4].

Resultados

El análisis de la red de distribución evidenció diferencias significativas entre los perfiles de demanda obtenidos a partir de medidores inteligentes y aquellos basados en mediciones agregadas, con desviaciones promedio del 13.06% y picos de hasta 24.60% en horarios nocturnos. Estos resultados resaltan la importancia de utilizar datos precisos para la planificación de redes eléctricas. Además, se observó que un aumento en la tensión reduce las pérdidas en la red, aunque los perfiles de tensión presentaron variaciones notables en ambos escenarios, lo que subraya la necesidad de modelos predictivos más precisos. En cuanto a la integración de generación solar distribuida, se determinó que niveles de penetración superiores al 50% generan sobretensiones considerables. Estas sobretensiones superaron el umbral del $\pm 5\%$, comprometiendo la operabilidad del sistema. Asimismo, se detectaron sobrecargas en transformadores y conductores de baja tensión, lo que resalta la necesidad de evaluar la capacidad de alojamiento ante el crecimiento de la generación distribuida [6], [7].

Con respecto a la red de transmisión, la integración del BESS demostró ser una estrategia efectiva para mitigar el impacto de fallas críticas, como una pérdida de generación superior a 160 MW. Un BESS ajustado permitió mantener la estabilidad de la frecuencia, evitando que se activen protocolos de protección de desconexión de cargas y garantizando el balance entre generación y demanda. Se comprobó que un enfoque distribuido, con unidades de 20 MW distribuidas en ocho subestaciones del sistema, pueden incrementar la estabilidad y flexibilidad en comparación con un sistema centralizado (una sola unidad de BESS). La integración de BESS demostró tener un impacto positivo en la gestión de la demanda y la reducción de pérdidas operativas, optimizando costos y mejorando la eficiencia del sistema, especialmente en horas pico [5], [4]. Adicionalmente, el estudio de optimización para la ubicación y dimensionamiento de BESS identificó puntos estratégicos debido al aumento de las capacidades de transferencias de potencia entre los países de la región. Se identificó un costo de inversión aproximado superior a los 400 millones de USD, que permitiría gestionar contingencias y reducir pérdidas en la red, actualmente hasta en un 17.4%.

Propuesta hoja de ruta para la integración de GD en Costa Rica

Los resultados obtenidos en los estudios analizados resaltan la importancia de adoptar estrategias claras y bien estructuradas para integrar la generación distribuida en el Sistema Eléctrico de Costa Rica. Con base en estos hallazgos, se propone una hoja de ruta (ver Figura 1) que permitirá guiar la transición hacia un sistema eléctrico más sostenible, eficiente y resiliente.

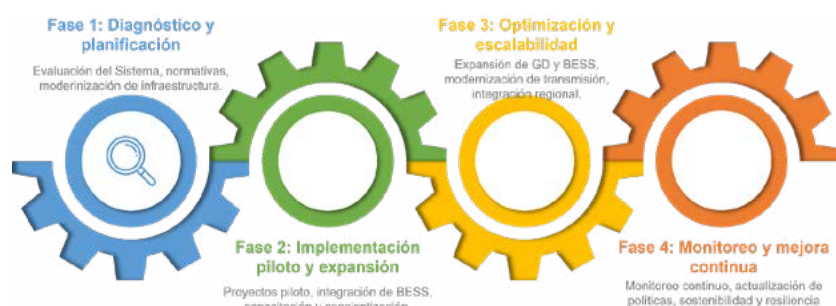


Figura 1. Hoja de ruta para la integración de GD en Costa Rica

Fase 1: Diagnóstico y Planificación (1-2 años)

- Evaluación del sistema: diagnóstico de la red de distribución, identificación de nodos críticos y análisis de perfiles de demanda con datos de medidores inteligentes [1].
- Normativas e incentivos: desarrollo de estándares técnicos y esquemas tarifarios para la integración de GD, priorizando zonas con alto potencial solar.
- Infraestructura: modernización de la red con reguladores de tensión, actualización de equipos y monitoreo en tiempo real [2].

Fase 2: Implementación Piloto y Expansión (3-5 años)

- Proyectos piloto: implementación de GD en zonas seleccionadas con distintos niveles de penetración (25%-100%), monitoreando impactos en tensión, pérdidas y estabilidad [2], [3].
- Integración de BESS: instalación de BESS en nodos estratégicos para mejorar estabilidad y gestión de demanda [4].
- Capacitación: formación de personal en redes con alta penetración de GD y concienciación sobre su adopción en sectores residencial, comercial e industrial.

Fase 3: Optimización y Escalabilidad (6-10 años)

- Expansión de GD y BESS: implementación nacional priorizando zonas con alta demanda y generación renovable, optimizando su ubicación mediante metodologías de optimización por etapas [4].
- Modernización de transmisión: utilización de tecnologías basadas en electrónica de potencia para manejar flujos bidireccionales, compensación de potencia reactiva y mejorar estabilidad.
- Integración regional: colaboración entre las compañías eléctricas para optimizar transferencia energética y exploración de mayores intercambios de energía [3], [4].
- Nuevas tecnologías: adopción de microrredes para mejorar eficiencia y resiliencia.

Fase 4: Monitoreo y Mejora Continua (+10 años)

- Monitoreo y evaluación: seguimiento continuo con herramientas de análisis predictivo para optimizar el desempeño del sistema.
- Políticas y normativas: revisión periódica para adaptar el marco regulatorio a nuevas tecnologías y necesidades del sistema.
- Sostenibilidad y resiliencia: fortalecimiento del sistema ante eventos extremos y maximización del uso de energías renovables para reducir emisiones de carbono.

Conclusiones

La integración de la generación distribuida en el Sistema Eléctrico de Costa Rica representa una oportunidad clave para avanzar hacia un modelo energético más sostenible y resiliente. Si bien la GD aporta beneficios como la reducción de pérdidas y la optimización de la demanda, también plantea desafíos técnicos, entre ellos las sobretensiones en nodos críticos, sobrecargas en equipos de baja tensión y la estabilidad del sistema ante una mayor penetración de fuentes intermitentes, como la solar. En este contexto, la implementación de BESS se perfila como una solución efectiva para mitigar estos problemas, permitiendo equilibrar generación y demanda, mejorar la flexibilidad operativa y reducir pérdidas. La transición hacia una red más integrada requiere una planificación estratégica basada en la optimización de la ubicación y dimensionamiento, junto con la modernización de la infraestructura de transmisión y distribución. La hoja de ruta propuesta, estructurada en cuatro fases, establece un marco progresivo desde el diagnóstico inicial hasta la expansión y mejora continua del sistema. Además, la colaboración regional entre las compañías eléctricas y la adopción de tecnologías emergentes, como microrredes inteligentes y vehículos eléctricos, serán fundamentales para garantizar la estabilidad y sostenibilidad del sistema. En este sentido, el éxito de la integración de la GD dependerá de una planificación rigurosa, inversiones estratégicas y un enfoque colaborativo que involucre a todos los actores del sector eléctrico.

Bibliografía

- [1] A. Gutiérrez Arguedas, "Capitalismo verde y energías 'limpias'/renovables: Costa Rica como laboratorio mundial de descarbonización," *Anuario Centro de Investigación y Estudios Políticos*, no. 11, pp. 195–228, 2020. <https://doi.org/10.15517/aciep.v0i11.43238>.
- [2] Z. Qu, C. Xu, F. Yang, F. Ling, and S. Pirouzi, "Market clearing price-based energy management of grid-connected renewable energy hubs including flexible sources according to thermal, hydrogen, and compressed air storage systems," *J. Energy Storage*, vol. 69, p. 107981, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107981>.
- [3] M. Z. Ul Abideen, O. Ellabban, and L. Al-Fagih, "A review of the tools and methods for distribution networks' hosting capacity calculation," *Energies*, vol. 13, no. 11, MDPI AG, Jun. 1, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13112758>.
- [4] G. A. Gómez-Ramírez, L. García-Santander, M. Zubiaga Lazkano, and C. Meza, "Increasing flexibility in vulnerable power grids using electrochemical storage," *Heliyon*, vol. 10, no. 16, p. e35710, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22253>.
- [5] G. A. Gómez-Ramírez, L. García-Santander, J. R. Rojas-Morales, M. Lazkano-Zubiaga, and C. Meza, "Electrochemical storage and flexibility in transfer capacities: Strategies and uses for vulnerable power grids," *Energies*, vol. 17, p. 5878, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17235878>.
- [6] Solis-Ortega, R., Gómez Ramírez, G. A., Sáenz-González, K. J., Ellis-Rodríguez, A. J., & Navarro-Alpízar, W. J. (2024). Evaluación del comportamiento de la demanda en el modelado de las redes de distribución. *Revista Tecnología En Marcha*, 38(1), Pág. 115–127. <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7050>
- [7] Solis-Ortega, R., Gómez-Ramírez, G. A., Brenes-Fallas, D., Morales-Hernández, J. P., & Umaña-Mondragón, M. (2025). Modelado de Redes de Distribución usando ETAP. *Revista Tecnología En Marcha*, 38(2), Pág. 48–62. <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7104>

Sobre los autores

Gustavo Adolfo Gómez Ramírez

Docente, investigador y consultor en la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Instituto Tecnológico de Costa Rica y la Universidad de Costa Rica. Es Doctor en Ingeniería del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>

Rebeca Solís Ortega

Docente, investigadora y extensionista en la Escuela de Matemática del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Es máster en Ciencias de la Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://orcid.org/0000-0002-3065-8386>