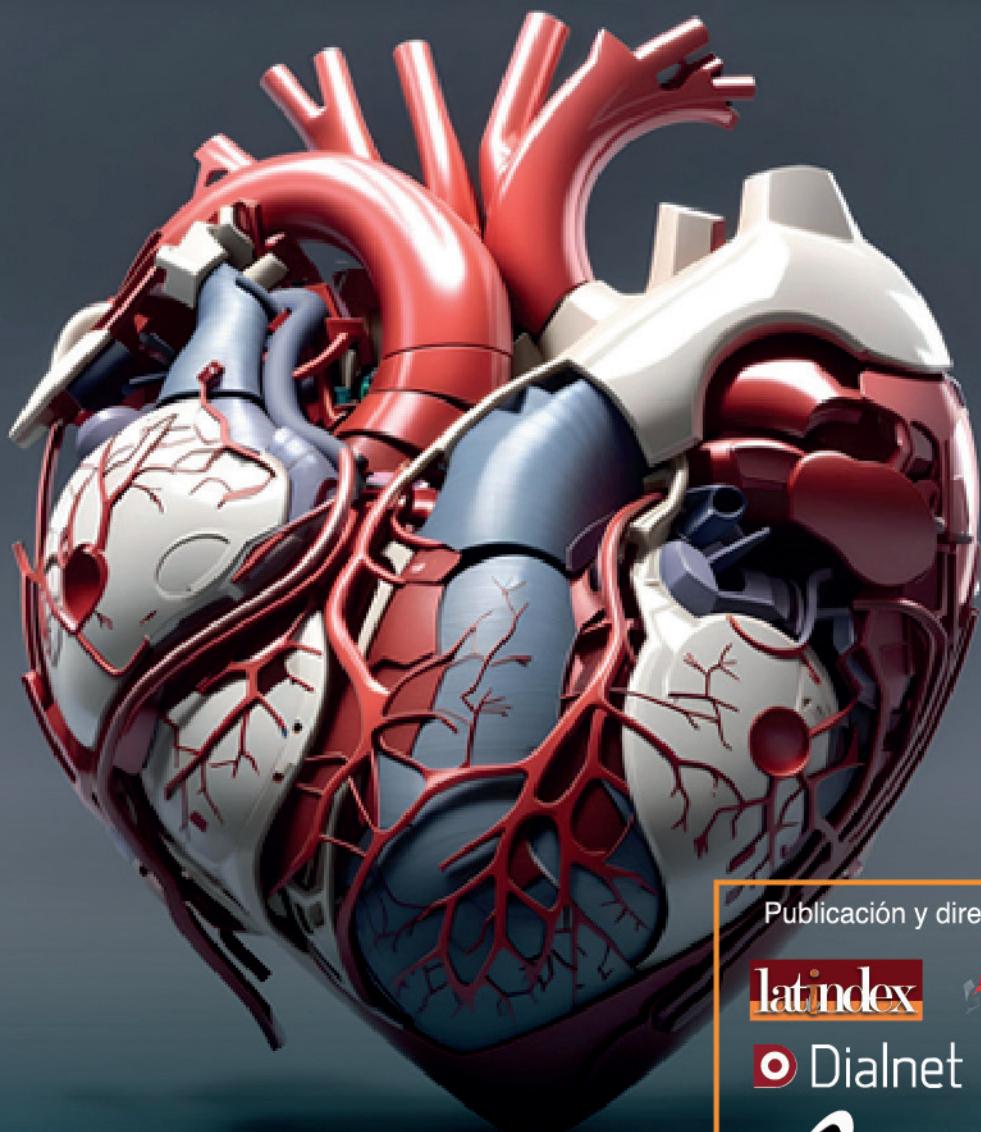




TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Abril – Junio 2025
Volumen 38 N° 2
ISSN-E 2215-3241



Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org UAEM

Dialnet

melICA

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Innovación y Conocimiento Científico

DOAJ

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León.
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen.
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Imagen de cubierta

<https://www.pexels.com>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica de Costa Rica. - Vol. 38-2. Abril-Junio, 2025
– Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618
Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr
Web: <https://www.tec.ac.cr/editorial>
http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



TEC | **Tecnológico**
de Costa Rica

La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

Publicación y directorio en catálogos

 redalyc.org
UAEM

 SciELO

 latindex

 Dialnet

 melica

 REDIB
Red Iberoamericana
de Innovación y Conocimiento Científico

 DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Carga de fuego de la <i>Typha domingensis</i> en el Parque Nacional Palo Verde Fuel load of the <i>Typha domingensis</i> in the Palo Verde National Park <i>Monserrat Solano-Gamboa, Javier Rodríguez-Yáñez</i>	3
Manejo de la nutrición, variedades y enfermedades fúngicas de caña de azúcar en el estado de Morelos, México Management of nutrition, fungal diseases and varieties of sugar cane in Morelos state, Mexico <i>Daniel Ménez-Astudillo, Ernesto Juniors Pérez-Torres, Alfredo Jiménez-Pérez, Mario Rodríguez-Monroy, Gabriela Sepúlveda-Jiménez</i>	15
Evaluación de la digestión anaeróbica de las aguas residuales de baja carga en una y dos etapas en escala de laboratorio Evaluation of anaerobic digestion of low-concentration wastewater in one and two stages at laboratory scale <i>Erick Javier Centeno-Mora, María Mercedes Rodríguez-Salina</i>	25
Viabilidad en la implementación de ASETs en la zona indígena Nai Teri, para la generación de energía eléctrica sostenible Implementation viability of ASETs at Nai Teri indigenous sector, for renewable electric energy generation <i>María Jesús Amador, Brandon Obregón, José Ambrozic, Gustavo Richmond-Navarro</i>	38
Modelado de Redes de Distribución usando ETAP Distribution Power Grids Modeling using ETAP <i>Rebeca Solís-Ortega, Gustavo A. Gómez-Ramírez, Dario Brenes-Fallas, Jose Pablo Morales Hernández, Marlon Umaña-Mondragón</i>	48
Evaluación del comportamiento del índice de humedad y vegetación en un cultivo de café por medio de sensores remotos utilizando Vehículos Aéreos no Tripulados Evaluation of moisture index and vegetation performance in a coffee crop by remote sensing using Unmanned Aerial Systems <i>Gerardo Enrique Mora-Pérez, Karolina Villagra-Mendoza, Sergio Arriola-Valverde</i>	63

Resistencia a la compresión del concreto: Una revisión - Caso Nicaragua Compressive strength of concrete: A review -Nicaragua case <i>Eddisson Francisco Hernández, Jennifer Manzanarez-Alvarado</i>	77
Evaluación económica de la producción de huevo fértil. Caso de estudio en Costa Rica Economic evaluation of fertile egg production. Case study in Costa Rica <i>Johanna Solórzano Thompson, Javier Paniagua Molina, Tatiana Solano Pereira, Royner Arce Carrillo, David Brenes Navarro</i>	89
Agregar un “asistente” de aprendizaje: mejorando la calidad de pseudo-etiquetas para la detección de objetos semi-supervisados Adding a teaching “assistant”: improving the quality of pseudo-labels for semi-supervised object detection <i>Fabian Fallas-Moya, Amir Sadovnik, Quan Zhou, Konstantinos Georgiou, Hairong Qi</i>	100
Predicción de Riesgo Cardiovascular en una Población de Atención Primaria Mediante el uso de Machine learning Predicting Cardiovascular Risk in a Primary Care Population Using Machine Learning <i>Fredy Troncoso-Espinosa, Juan San Martín-Durán</i>	112
Determinación de la presencia del fungicida Clorotalonil en agua potable proveniente de comunidades en Costa Rica mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) Determination of the presence of the fungicide Chlorothalonil in drinking water from communities in Costa Rica using High Resolution Liquid Chromatography (HPLC) <i>Priscilla Rojas-Alvarado, Alexandra Chavarría-Chavez, Britany Jiménez-Carmona</i>	125
Guía metodológica para la limpieza de espacios públicos Guideline for public places cleansing <i>Melvin Andrade-Velásquez, Lilliana Abarca-Guerrero</i>	139
Valorización del residuo agroindustrial del tabaco (Nicotina Tabacum L.), utilizándolo en mezclas con pulpa celulósica reciclada, de papel de oficina y diario, para la elaboración de productos moldeados Valorization of Agroindustrial Waste from Tobacco (Nicotina Tabacum L.), Using it in Mixtures with Recycled Cellulosic Pulp, Office and Newspaper Paper for the Preparation of Molded Products <i>Eyra María Albarrán Molina, Israel Quintero</i>	152

Carga de fuego de la *Typha domingensis* en el Parque Nacional Palo Verde

Fuel load of the *Typha domingensis* in the Palo Verde National Park

Monserrat Solano-Gamboa¹, Javier Rodríguez-Yáñez²

Fecha de recepción: 29 de mayo, 2024

Fecha de aprobación: 6 de setiembre, 2024

Solano-Gamboa, M; Rodríguez-Yáñez, J. Carga de fuego de la *Typha domingensis* en el Parque Nacional Palo Verde. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 3-14.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7066>

¹ Universidad Estatal a Distancia, Vicerrectoría de Investigación, Laboratorio de Ecología Urbana, 2050 Sabanilla, San José, Costa Rica;

 monsesolg99@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-3626-9987>

² Universidad Estatal a Distancia, Vicerrectoría de Investigación, Laboratorio de Ecología Urbana, 2050 Sabanilla, San José, Costa Rica;

 jrodriguezy@uned.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5539-3153>

Palabras clave

Humedales; área de conservación; poder calorífico; propagación de llama; sitio Ramsar; incendio.

Resumen

La *Typha domingensis*, es una planta nativa en Costa Rica que ha logrado proliferar intensamente en algunas de las lagunas del Parque Nacional Palo Verde (PNPV). Debido a su difícil control sigue siendo una de las especies que más ayuda a propagar los casos de incendios forestales.

Las propiedades de la *Typha* en el PNPV se analizaron de dos formas: como mediciones de las características de la planta en campo y como mediciones fisicoquímicas en el laboratorio. En las mediciones de campo se apreció una diferencia entre las características físicas, distribución y peso según la zona de estudio, siendo los sitios de Nicaragua y Espuelas los que presentan mayor diferencia.

Con respecto a las curvas de secado, es posible considerar que las distintas partes de la planta no presentan una diferencia significativa con respecto a la posibilidad de retener humedad.

En cuanto al avance de llama, la *Typha* no presenta un avance significativo al eliminar la llama, pero se logró identificar que la raíz es capaz de mantener la brasa. Por último, se apreció que la planta presenta un mayor poder calorífico en su espiga, relacionado a la composición de su semilla, y una carga combustible promedio baja de 156 MJ m^{-2} .

Por lo anterior se puede considerar que las características de la *Typha* se ven influenciadas por el sitio evaluado, respecto a su crecimiento y número de plantas por m^2 , lo cual condiciona la densidad de carga de fuego estimada en cada lugar, pero sin una variación significativa en el parque, pudiendo tomarse el valor promedio indicado.

Keywords

Wetlands; conservation area; calorific power; flame propagation; Ramsar site; fire.

Abstract

Typha domingensis, a native plant in Costa Rica, has managed to proliferate intensively in some of the lagoons of the Palo Verde National Park (PVNP). However, due to its difficult control, it continues to be one of the species with the highest incidence of forest fires.

The properties of *Typha* in PVNP were analyzed in two ways: as measurements of plant characteristics in the field and as physicochemical measurements in the laboratory.

Field measurements showed a difference between physical characteristics, distribution and weight according to the study area, with the Nicaragua and Espuelas sites showing the greatest difference.

With respect to the drying curves, it is possible to consider that the different parts of the plant do not present a significant difference with respect to the possibility of retaining humidity.

Regarding to the flame advance, *Typha* does not show a significant advance when the flame is eliminated, but it was possible to identify that the root is capable of maintaining the ember. Finally, it was found that the plant has a higher calorific value in its spike related to the composition of its seed, while it has a low average fuel load of 156 MJ m^{-2} .

Therefore, it can be considered that the characteristics of *Typha* are influenced by the site evaluated, with respect to its growth and number of plants per m^2 , which conditions the estimated fire load density at each site, but without a significant variation in the park, and the average value indicated can be taken.

Introducción

El Parque Nacional Palo Verde (PNPV), creado en el año de 1980 y catalogado Sitio Ramsar, es una zona de conservación desde 1991. Considerando un humedal de relevancia nacional es importante tomar en cuenta que este es un espacio geográfico de régimen acuático, con un alto valor ecosistémico debido a su importancia como hábitat de numerosas especies de flora y fauna. Así como reservorio de carbono, regulador del ciclo del agua, barrera contra la erosión, entre otros, por lo que resulta de interés indispensable su monitoreo y protección [1].

En el caso particular del PNPV, se presenta un ecosistema estacional de humedales singulares que, al estar rodeado de bosque tropical, resulta ser un hábitat y refugio para varias especies, entre los que resaltan las aves migratorias y algunas residentes. Pese a lo anterior, el parque presenta una problemática seria en sus lagunas, debido a la invasión de una serie de plantas acuáticas, que colonizan los espejos de agua perjudicando los ecosistemas naturales de las aves acuáticas [2].

Dentro de las plantas que más han afectado las lagunas del parque se encuentra la *Typha domingensis*, una especie nativa que ha proliferado intensamente. Entre las posibles causas por las que la planta haya logrado adquirir este comportamiento resaltan: el pasar a ser área protegida, el consiguiente retiro del ganado que pastaba en la hacienda y la falta de mantenimiento en los esteros de conexión de las lagunas con el río Tempisque [3].

Debido a lo anterior, el Parque ha tomado medidas preventivas para el control de la *Typha*, utilizado técnicas como el fangueo, remoción directa, y quemas controladas. Las mismas han permitido aumentar el espejo de agua disponible y disminuir los problemas de incendio en época seca. Esto ha generado una recuperación limitada de las áreas antes invadidas [4]. No obstante, durante la época seca, cuando se produce una mayor incidencia de incendios forestales, la *Typha* sigue siendo una de las especies que presenta más potencial para ocasionar incendios forestales dada la facilidad con la que se quema. Durante el 2010 se estima que se llegaron a quemar 1,6 ha de *Typha* por minuto, afectando unas 3000 ha [5]. Es debido a esto que estudiar las propiedades físico-químicas y combustibles de la *Typha domingensis*, permitirá establecer consideraciones básicas para su posible manejo.

Materiales y métodos (metodología)

Área de estudio: La evaluación del sitio y la toma de muestras se realizó durante la época seca, en el mes de mayo del 2021, en el Parque Nacional Palo Verde, debido a la mayor posibilidad de acceso a las lagunas.

En la zona de estudio se identificaron tres zonas con características particulares para la *Typha*, que en primera instancia podrían generar diferencias específicas dado las condiciones a las que se ven expuestas (ver Figura 1).

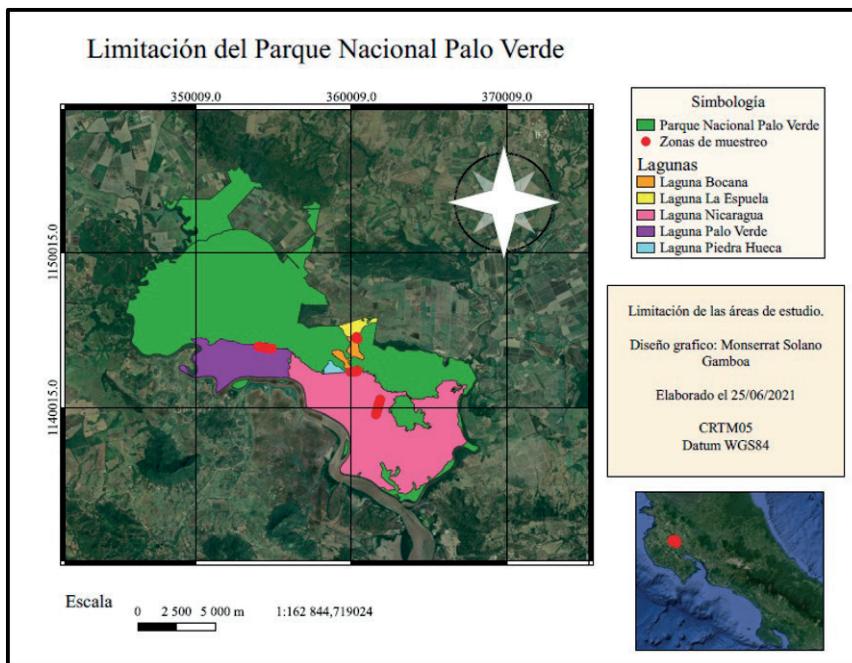


Figura 1. Ubicación del Parque Nacional Palo Verde, sus lagunas y los sitios de muestreo

Estas zonas fueron:

- Laguna Nicargua, área principal inundable, sin tratamiento de manejo para la *Typha* durante los dos últimos años.
- Laguna Palo Verde, área secundaria inundable, la cual presentaba un manejo por acción del ganado y tratamiento por técnica de fangueo durante el año anterior, al momento del estudio.
- La zona de Espuelas, la cual abarca las lagunas: Espuelas, Bocana y Piedra Hueca. En esta zona en particular las lagunas no se secan debido al Proyecto de riego Arenal-Tempisque que aporta agua al río Corobici. De la misma manera se planteó como un área posiblemente afectada por los nutrientes, sedimentos y agroquímicos provenientes de las plantaciones colindantes al Parque.

Muestreo: Localizadas las zonas a trabajar se escogieron 1000 m de una línea cortafuego por zona. Dicha línea fue dividida en 4 sectores de 250 m cada uno, generando 5 parcelas de 50 m en cada sector. Para cada parcela se tomaron 5 medidas al azar de datos biofísicos: altura, diámetro del tallo a la altura del pecho (DAP), tamaño de inflorescencia y cantidad de hojas. Asimismo, se extrajo una planta completa de *Typha* compuesta por: espiga (semilla), tallo-hojas y raíz. Esto representó un total de 100 mediciones y 20 muestras de planta recolectadas por zona de estudio.

Adicionalmente en cada parcela se utilizó una cuadrícula de 1 m², a fin de estimar el número de plantas por metro cuadrado, en cada sector.

Todas las zonas siguieron este procedimiento a excepción de la zona Espuelas, en donde debido a las difíciles condiciones de acceso, (profundidad de agua elevada y presencia de fauna silvestre peligrosa), el muestreo se dividió en dos partes. Una en el contorno de agua existente a la Laguna Espuela (250 m) y otra en el contorno del Dique Cubano (750 m) que es la salida de las lagunas Bocana y Piedra Hueca.

Propiedades fisicoquímicas de la *Typha*: Sobre las muestras de *Typha* recolectadas en cada sitio se realizaron los siguientes ensayos:

- **Propiedades físicas:** Con los datos obtenidos durante la recolecta de muestras se estimó un promedio en el: número de hojas, diámetro y tamaño de espiga. Así como el peso promedio de la planta y densidad de campo en cada zona de estudio (Nicaragua, Palo Verde, Espuelas).
- **Curvas de secado:** Las muestras de tallo-hoja y raíz, previamente separadas, fueron molidas y tamizadas entre malla Mesh 10 y 20; rehumectadas y secadas a 50°C en una balanza de secado, marca OHAUS, modelo MB120. A partir de las mismas se obtuvieron los parámetros de secado descritos por Rodríguez Yáñez [6] para cada una de las zonas.
- **Poder Calorífico:** Se realizó el análisis por medio de una bomba calorimétrica marca LECO, modelo AC500, sobre las muestras trituradas y secadas previamente. El poder calorífico en este caso se expresó como poder calorífico superior en kJ g-1.
- **Termogravimetría:** Las curvas Termogravimetría (TGA) se obtuvieron con ayuda del equipo TA Instruments, modelo SDT Q600, siguiendo la metodología de Sebio-Puñal et al. [7].
- **Propagación de llama:** Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Protección Contra Incendios (LAPCI) de la Universidad de Costa Rica, bajo los procedimientos de ASTM D5132-11 [8] en propagación de llama horizontal y ASTM D6413 – 08 [9] para la propagación de llama vertical. Durante este proceso se realizó un secado por 24 h a 40% de HR y 35°C, con la finalidad de asemejar a las condiciones de época seca para el sitio de estudio.
- **Carga de combustible:** Se obtuvo a partir de los datos obtenidos de la densidad de plantas por m², peso medio, y su poder calorífico. Para ello se empleó la ecuación 1:

$$\text{Carga combustible} = (\text{Densidad de plantas} \times \text{masa de plantas} \times \text{poder calorífico}) \quad (1)$$

Resultados

Propiedades físicas

Medidas de campo

Dentro de las tres zonas de estudio, fue posible identificar a la zona de Espuelas como la que presenta los parámetros físicos más elevados, posiblemente asociado a las condiciones específicas de esta zona como se observa en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características físicas de la *Typha domingensis* según zona de estudio

	Nicaragua	Palo Verde	Espuelas
<i>Número de hojas</i>	6 ± 2	9 ± 2	12 ± 2
<i>DAP (cm)</i>	10 ± 1	16 ± 4	25 ± 8
<i>Altura (m)</i>	2,6 ± 0,1	2,5 ± 0,2	2,8 ± 0,3
<i>Espiga (cm)</i>	27 ± 5	26 ± 6	34 ± 12
<i>Densidad de plantas (m⁻²)</i>	19 ± 1	23 ± 3	23 ± 2

Porcentaje en peso

Con respecto al porcentaje de peso según zona, como se observa en el Cuadro 2 pese a que los pesos no varían de forma significativa hay una relación entre el tamaño general de la planta y la cantidad de agua y/o nutrientes disponibles. A excepción de la raíz de Nicaragua, cuyo tamaño fue mayor en comparación al resto producto de las condiciones de escases de la zona.

Cuadro 2. Promedio del peso obtenido por parte de la planta según su zona

	Nicaragua (g)	Palo Verde (g)	Espuelas (g)
Parte de la planta			
Espiga	25 ± 1	50 ± 1	75 ± 1
Tallo - Hojas	225 ± 2	300 ± 3	325 ± 3
Raíz	325 ± 3	275 ± 3	200 ± 2
Total	575 ± 60	625 ± 70	600 ± 60

Curvas de secado

En el proceso de secado de las distintas partes de la *Typha* se identificaron claramente dos zonas de pérdida de masa, ver Cuadro 3. Una primera asociada a la perdida de humedad fácilmente removible y otra asociada a la humedad interna más retenida en la biomasa de la *Typha*. Los parámetros obtenidos permitieron una visualización de la facilidad con que la *Typha* pierde agua en su biomasa.

Cuadro 3. Datos obtenidos durante las curvas de secado para cada una de las partes en cada muestra

	Tallo - hojas	Raíz	Espiga
Humedad (%)	77 ± 7	75 ± 1	68 ± 5
X crítico (X_c)	0,23 ± 0,08	0,24 ± 0,06	0,33 ± 0,06
dm/dt en X_c (mg min ⁻¹)	0,9 ± 0,2	0,9 ± 0,2	0,8 ± 0,1
A flux esp (m ² g ⁻¹)	25 ± 4	85 ± 1	15 ± 2
X_D	0,7 ± 0,3	0,7 ± 0,1	0,9 ± 0,1
K específico (s ⁻¹ m ⁻²)	1,2 ± 0,4	2,6 ± 0,9	1,7 ± 0,3
Densidad Aparente (ρ) (g cm ⁻³)	0,22 ± 0,01	0,24 ± 0,01	ND

Bomba calorífica/ Poder calorífico

De las tres partes estudiadas en el análisis de poder calorífico se identificó a la semilla como la que genera mayor cantidad de energía, seguida por tallo-hojas y por último raíz. Adicionalmente como se observa en el Cuadro 4, se realizó una ponderación respecto a la masa de sus partes, a fin de ser utilizada para el cálculo de la carga de fuego.

Cuadro 4. Resultados obtenidos para el poder calorífico de la *Typha Domingensis*

Parte de las plantas	Poder calorífico (KJ g ⁻¹)
<i>Semilla</i>	16,5 ± 1,1
<i>Tallo - hojas</i>	13,5 ± 0,9
<i>Raíz</i>	9,5 ± 0,1
<i>Ponderado</i>	12 ± 1

Termogravimetría (TGA)

Con respecto a la prueba de termogravimetría (Figura 2 y 3), efectuada en tallo – hojas y raíz secos, se identificaron dos principales zonas de pérdida de masa. La primera perdida, asociada con la disminución de agua interna; y una segunda fase de pérdida resultante de un proceso de degradación más complejo asociado a la descomposición de celulosa y hemicelulosa. Los valores característicos se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Valores característicos del ensayo de TGA

Muestra	Rango de descomposición principal (°C)	Pérdida de masa en el rango de descomposición principal (%)	Humedad (%)	Cenizas (%)
<i>Tallo - Hojas</i>	(200 - 382)	44 ± 7	13 ± 4	20 ± 2
<i>Raíz</i>	(200 - 408)	38 ± 8	16 ± 5	27 ± 3

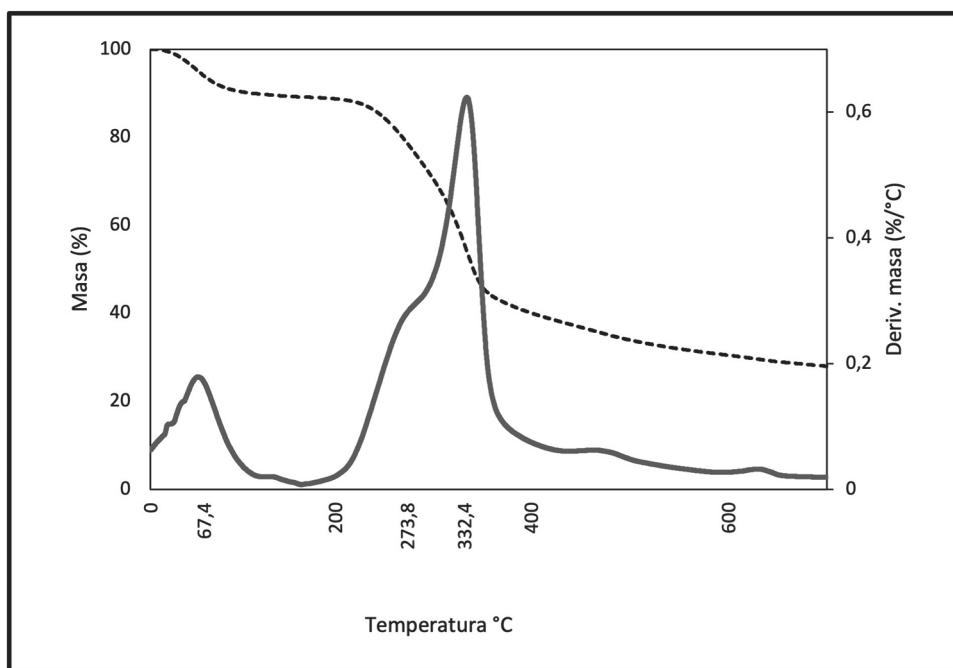


Figura 2. Prueba TGA para muestra de hoja, donde a) curva punteada variación de la masa (%), b) curva continua derivada de la variación de masa con temperatura (%/°C).

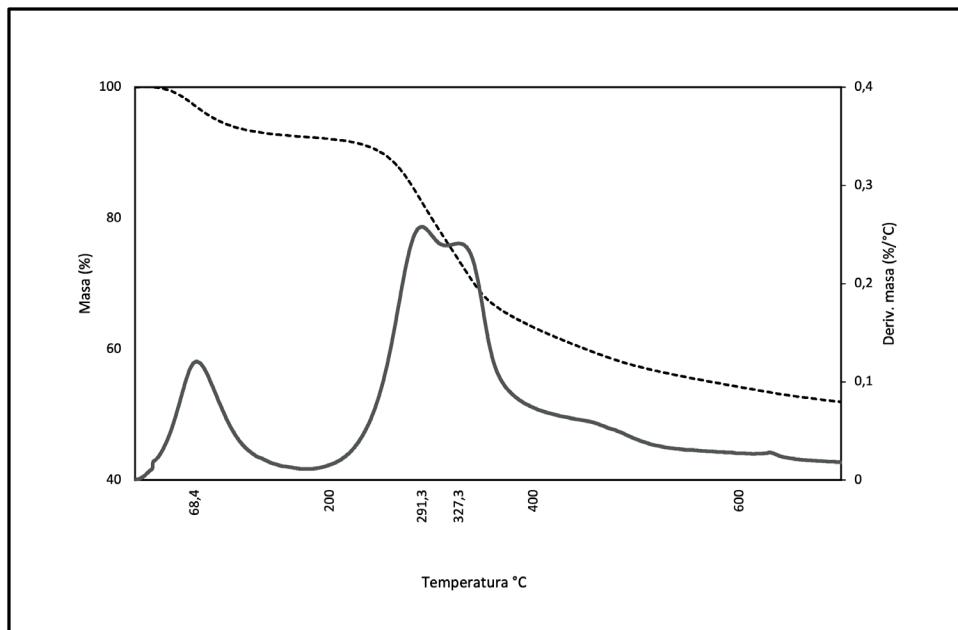


Figura 3. Prueba TGA para muestra de raíz, donde: a) curva punteada variación de la masa (%), b) curva continua derivada de la variación de masa con temperatura (%/°C).

Avance de llama

Los ensayos de avance de llama, se realizaron sobre las muestras secas de hoja-tallo y raíz, según se aprecia en los Cuadros 6 y 7. Dichos valores de velocidad de combustión son moderados, presentando la particularidad de una llama que no logra mantenerse y una brasa que demora en apagarse.

Cuadro 6. Ensayo para determinar la propagación horizontal de la llama

Características	Tipo de combustión	
	Velocidad (mm min ⁻¹)	Observación
<i>Hoja</i>	$3,1 \pm 0,5$	No hay avance al quitar la llama
<i>Raíz</i>	$3,4 \pm 0,8$	No hay avance al quitar la llama
<i>Tallo</i>	$1,9 \pm 0,5$	No hay avance al quitar la llama

Cuadro 7. Ensayo para determinar la propagación vertical de la llama

Características	Tipo de combustión	
	Velocidad (mm min ⁻¹)	Observación
Hoja	$2,4 \pm 0,5$	Avance de llama 20s después de quitar la llama
Raíz	$1,5 \pm 0,2$	Avance de llama 20s después de quitar la llama
Tallo	$3,4 \pm 0,4$	Avance de llama 20s después de quitar la llama

Carga de fuego

La estimación de la carga de fuego de la *Typha* en promedio fue de $156 \pm 42 \text{ MJ m}^{-2}$. Mientras que por zona de estudio se observó un mayor resultado la zona de Palo Verde ($173 \pm 47 \text{ MJ m}^{-2}$), seguida por Espuelas ($166 \pm 45 \text{ MJ m}^{-2}$) finalizando con Nicaragua ($131 \pm 35 \text{ MJ m}^{-2}$).

Conclusiones y/o recomendaciones

Dentro de los parámetros físicos obtenidos para la *Typha*, en las distintas zonas de estudio, se observó que la zona de Espuelas presenta valores un poco mayores que los otros dos sitios analizados. Esto estaría asociado a que en dicha zona no se han realizado medidas preventivas para su crecimiento y expansión. Aunado a esto dicha laguna presenta niveles de agua más estables, así como posibles aportes de nutrientes lixiviados de las áreas de cultivo cercanas, lo que también favorecería su crecimiento [10]. Es normal que, en áreas inundadas con una gran cantidad de nutrientes, exista una rápida elongación y aumento de biomasa en los brotes, debido a que se invierte más biomasa en la producción de hojas, con la finalidad de aumentar la captación de luz y la posibilidad de supervivencia [11].

Por el contrario, las plantas encontradas en la Laguna Nicaragua, en comparación a las demás presentan menores resultados en número de hojas y diámetro. Es importante mencionar que la mayoría de estas plantas se encontraban ya secas, por lo que es normal inducir que perdieran algunas de sus hojas y grosor en comparación de las plantas encontradas en zonas expuestas a mayor cantidad de agua [12].

Con respecto a las plantas de la Laguna Palo Verde, estas presentaron un menor promedio en altura y en su espiga, es posible que este leve debilitamiento se pueda ligar a una mayor frecuencia de técnicas de manejo como fangueo en el sitio. Esta última, es una técnica que implica el paso repetido de un tractor agrícola con ruedas metálicas que se encarga de triturar los tallos de la vegetación emergentes y dejarlos bajo el agua, ayudando a generar espacios abiertos en el humedal [13].

Referente a los pesos de las distintas partes de la *Typha* en las zonas de estudio, se observa con claridad la influencia de las condiciones de las mismas en la proporción y desarrollo de las partes de la planta. En las zonas secas o de escasos recursos la planta concentra su desarrollo en la raíz, mientras que en los casos opuestos se desarrolla más el tallo-hojas, y la espiga. A pesar de esto los pesos totales de las plantas se mantienen en un rango de unos ($600 \pm 60 \text{ g}$). Este valor presenta una dispersión algo mayor en la Laguna Palo Verde, posiblemente debido al fangueo que se realiza en la misma.

En las curvas de secado fue posible identificar que cada parte de la *Typha* analizada, no tiene una diferencia significativa con respecto a su posibilidad de retención de humedad. En general la retención de humedad presenta valores elevados del orden del ($73 \pm 6 \%$) Así mismo, los otros parámetros de secado resultan también similares, presentando valores de X_C (fracción humedad perdida fácilmente) del orden del 0,24 y de X_D (fracción de humedad perdida en secado intenso) de 0,7. Los valores de las áreas fluxionales y K específico son mayores para la raíz, lo cual es esperable para una estructura cuya función es la absorción de nutrientes. Mientras que la densidad es relativamente similar entre las partes.

En relación a las curvas de TGA, se identificaron dos zonas de pérdida de masa. La primera pérdida, asociada con la pérdida de agua. Y una segunda zona, relacionada a procesos más complejos, usualmente asociados a la degradación de la hemicelulosa y la celulosa de la planta. Mukhtar y Abdullahi [14], plantean que el proceso de descomposición térmica de la

Typha comienza a unos 200 °C por la hemicelulosa. Este proceso es seguido rápidamente por la descomposición de la celulosa hasta unos 400 °C. Finalizando con la lignina caracterizada por poseer una descomposición lenta a temperaturas más altas.

En este caso se puede apreciar, la existencia de un solapamiento de los picos asociados a los dos primeros compuestos entre un rango de temperatura que inicia antes de los 271°C y finaliza cerca de los 335°C. Michael et al. [15] menciona que durante los procesos calorimétricos pueden presentarse rangos de temperatura superpuestos. Esto es debido a que existen distintas etapas de transformación y pérdida de masa, que pueden variar debido a una distinta proporción de las unidades estructurales, según la parte de la muestra a utilizar. En el caso de la *Typha* estos procesos se consideran como secuenciales.

En cuanto a los valores visualizados en el poder calorífico para las distintas partes de la *Typha*, evidenciamos que todas tienen valores diferentes, siendo la espiga la de mayor energía, seguida por las tallo- hojas y finalmente la raíz. Esto parece estar asociado a la composición de las partes, identificadas en las curvas de TGA, en cuanto a proporciones de lignina y hemicelulosa, así como de cenizas.

En este caso los resultados de cenizas estas fueron entre un 20-27% de la masa seca, valores superiores a los obtenidos normalmente en este tipo de análisis. Algunos autores [14] mencionan que el porcentaje de cenizas en la especie *Typha* suele ser mayor al encontrado en otras especies de pastos y paja que van de entre (2,7- 6,6 %), mientras que otros [16] menciona que el promedio de cenizas en *Typha* es variable según factores como el estado de la planta y su relación con el suelo.

En relación al Avance de llama, apreciamos que la *Typha* no presenta un avance significativo al eliminar la llama en el desplazamiento horizontal. Presentando en general una velocidad de unos 30 a 60 mm min⁻¹ con llama, pero manteniendo brasa al eliminar esta. Mientras que para el desplazamiento vertical los valores son un poco mayores del orden de 100 a 150 mm min⁻¹, pero no se mantienen si se quita la llama. Lo anterior indicaría que, aunque presenta valores de propagación similares a los pastos de sabana [17], la planta por sí misma no es un dispersor importante del fuego en ambientes poco ventosos. Sin embargo, es importante considerar que en época seca en la zona los vientos alisios se suelen intensificar, lo que puede considerarse en un riesgo para la dispersión del fuego [18]. Además de que la altura de la misma afecta en la dispersión del fuego debido a que el viento es capaz de arrastrarlo. Ahora bien, de forma particular el tallo actúa como amortiguación del avance de llama en los procesos horizontales, por su baja velocidad de avance de llama, pero no así en el avance vertical. Esto último resulta muchas veces compensado por la alta densidad de biomasa por m².

Por último, la estimación general de la carga combustible que considera el poder calorífico existente en un sitio específico por unidad de área representa un nivel del orden de 156 MJ m⁻². Este valor es menor a los obtenidos por Chavarría-Valverde y Rodríguez [17] para pastos de sabana, con una carga combustible de 9590 MJ m⁻² para plantas herbáceas y gramíneas. En relación a cada zona de estudio en concreto observamos que la Laguna Nicaragua presenta una menor carga de fuego, debido a una menor cantidad de plantas y menor masa respecto a los otros sitios. Mientras que Espuelas y Palo Verde presentaron resultados similares.

Con base a lo expuesto podemos apreciar una influencia directa entre las características específicas de una zona y las características de las plantas. Del mismo modo, se resalta la importancia de seguir implementando técnicas como el fangueo, que, según el análisis realizado, generan un debilitamiento en las características de la planta. También es importante prestar atención a la implementación otras técnicas de control en el parque ya que se aprecia una densidad de plantas bastante uniforme con unas características de propagación de fuego y carga combustible que pueden poner en riesgo al área protegida.

Agradecimientos

MS es becaria de la Organización de Estudios Tropicales Organización de Estudios Tropicales y al Fondo de Investigación Dole Food (Fondo 513/563), quienes financiaron su estancia en el parque Palo Verde. Adicionalmente MS agradece el apoyo a la investigación, aportado por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación- Área de Conservación Arenal Tempisque - Parque Nacional Palo Verde, así como al proyecto Elaboración de protocolo de medición y análisis de datos, obtenidos para una muestra simple, en una balanza de secado (PROY – 2019-36) de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Estatal a Distancia y al Laboratorios de Prevención de Incendios de la Universidad de Costa Rica por el apoyo en los análisis para este artículo.

Referencias

- [1] J. Rojas-Zeledón., “Erosión hídrica bajo tres estadios de sucesión de bosque dentro del Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica”, *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 15, no 36, pp. 65-75, 2018. DOI:10.18845/rfmk.v15i36.3425
- [2] J. Acuña Piedra y M. J. Elizondo Campos, “Inventario nacional de humedales para Costa Rica: Resultados preliminares”, *Revista Ambientico* vol. 266, pp. 4-9, 2018 https://www.ambientico.una.ac.cr/wp-content/uploads/tainacan-items/5/28285/266_4-9.pdf
- [3] P. Vargas, “Especies exóticas invasoras: dos casos en humedales Ramsar”, *Revista Ambientico*, vol. 266, pp. 34-40, 2018. https://www.ambientico.una.ac.cr/wp-content/uploads/tainacan-items/5/28389/266_34-40.pdf
- [4] L. Guizada, “Integridad ecológica de humedales de la cuenca baja del río Tempisque, caso Humedal Protegido Internacional Palo Verde, Costa Rica”, Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica, 2018. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8886>
- [5] W. Murrillo y M. Masís, “Rehabilitación de ecosistemas de humedal como medida de adaptación a los impactos de la variabilidad climática: El caso del sitio Ramsar Palo Verde, sector Catalina”, *Revista Ambientico*, vol. 266, pp. 50-57, 2018. https://www.ambientico.una.ac.cr/wp-content/uploads/tainacan-items/5/28422/266_50-57.pdf
- [6] J. Rodríguez-Yáñez , “Parameters for Use of Waste Castor-Oil Seed (*Ricinus communis*) as Biomass”, *International Journal of Renewable Energy & Biofuels* vol. 2019, pp. 1-8, 2019. DOI: 10.5171/2019.529157
- [7] T. Sebio-Puñal, S.Naya, J. López-Beceiro, J. Tarrío-Saavedra, y R. Artiaga, “Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 109, pp. 1163–1167, 2012. DOI 10.1007/s10973-011-2133-1
- [8] ASTM Standars, “Standard Test Method for Horizontal Burning Rate of Polymeric Materials Used in Occupant Compartments of Motor Vehicles”, ASTM Standars D5132-11, United Estates, 2014.
- [9] ASTM Standars, “Standard Test Method for Flame Resistance of Textiles (Vertical Test)”, ASTM Standards, D6413-08, United Estates, 2014.
- [10] J. Santos, E. Castro; M. Pereira, F. Fogaroli y F. Pereira, “Root growth and anatomy of *Typha domingensis* Pers. related to phosphorus availability”, *Acta Limnologica Brasiliensis*, vol. 33, pp. e9, 2021. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2120>
- [11] Y. D. C. Cruz, “Características anatómicas e fisiológicas foliares e crescimento de *Typha domingensis* Pers. Submetida à diferentes disponibilidades hídricas”, Tesis M. S., Universidade Federal de Lavra, Lavras, Brasil, 2017. <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/12818>
- [12] D. González, U. Álvarez y R. Lima, “Acumulación de biomasa fresca y materia seca por planta en el cultivo intercalado caupí – sorgo”, *Revista Centro Agrícola*, vol. 45, no. 2, pp. 77-82, 2018. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v45n2/cag11218.pdf>
- [13] J. Bufford y E. González, “Manejo del humedal Palo Verde y de las comunidades de aves asociadas a sus diferentes hábitats”, *Ambientales*, vol. 43, pp. 7-16, 2012. <https://doi.org/10.15359/rca.43-1.1>
- [14] A. Mukhtar y I. Abdullahi, “*Typha* Biomass Energy for Sustainable Management of *Typha domingensis* L. in Affected Communities of Northern Nigeria”, *Dutse Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 6, no. 4, pp. 246-252, 2020. https://fud.edu.ng/journals/dujopas/2020_Dec_Vol_6_No_4/67.pdf
- [15] A. Michaela, Y. Zhoua, M. Yavuza y M. Khanb, “Deconvolution of overlapping peaks from differential scanning calorimetry analysis for multi-phase NiTi alloys”, *Thermochimica Acta*, vol. 665, pp. 53–59, 2018. <https://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2018.05.014>

- [16] O. Tariq, S. Omer y O. Taha, "Alkaline Pulping of *Typha domingensis* Stems from Sudan", *World Applied Sciences Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 331-336, 2012. https://www.researchgate.net/publication/216845211_Alkaline_Pulping_of_Typha_domingensis_Stems_from_Sudan
- [17] Y. Chavarría-Valverde y J. Rodriguez, "Estimación de la carga de combustible presente en el sector El Hacha del Parque Nacional Guanacaste, Costa Rica", *Biocenosis*, vol. 33, no. 1, pp. 85-96, 2022. <https://doi.org/10.22458/rb.v33i1.4289>
- [18] P. Blanca, (10 de Julio del 2019). La Universidad de Costa Rica (UCR) impulsa acciones coordinadas con instituciones en comunidades del Corredor Seco Centroamericano en Guanacaste. *UCR noticias*. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/07/10/guanacaste-en-la-enrucijada-frente-al-clima.html>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Manejo de la nutrición, variedades y enfermedades fúngicas de caña de azúcar en el estado de Morelos, México

Management of nutrition, fungal diseases and varieties of sugar cane in Morelos state, Mexico

Daniel Ménez-Astudillo¹, Ernesto Juniors Pérez-Torres², Alfredo Jiménez-Pérez³, Mario Rodríguez-Monroy⁴, Gabriela Sepúlveda-Jiménez⁵

Fecha de recepción: 14 de mayo, 2024

Fecha de aprobación: 27 de agosto, 2024

Ménez-Astudillo, D; Pérez-Torres, E.J; Jiménez-Pérez, A; Rodríguez-Monroy, M; Sepúlveda-Jiménez, G. Manejo de la nutrición, variedades y enfermedades fúngicas de caña de azúcar en el estado de Morelos, México. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 15-24.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7076>

1 Centro de Desarrollo de Productos Bióticos-Instituto Politécnico Nacional, Yautepec, Morelos. México.

 dmeneza1800@alumno.ipn.mx

 <https://orcid.org/0009-0002-9933-9452>

2 Centro de Desarrollo de Productos Bióticos-Instituto Politécnico Nacional, Yautepec, Morelos. México.

 eperez@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-5826-1364>

3 Centro de Desarrollo de Productos Bióticos-Instituto Politécnico Nacional, Yautepec, Morelos. México.

 aljimenez@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-6170-746X>

4 Centro de Desarrollo de Productos Bióticos-Instituto Politécnico Nacional, Yautepec, Morelos. México.

 mrrmonroy@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-6201-7594>

5 Centro de Desarrollo de Productos Bióticos-Instituto Politécnico Nacional, Yautepec, Morelos. México.

 gsepulvedaj@ipn.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-0033-9306>

Palabras clave

Caña de azúcar; fertilizantes químicos; fertilizantes biológicos; enfermedades por hongos.

Resumen

En México, el estado de Morelos ocupa el primer lugar en el rendimiento agrícola de la caña de azúcar, pero es escasa la información del estado actual del manejo del cultivo y fue objeto de estudio. Para lo cual, se diseñó una encuesta y se aplicó a una muestra de 195 productores de caña de azúcar que pertenecen a los nueve municipios principales en los que se cultiva un 74.0 % de la caña de azúcar en el estado de Morelos. Los datos de la encuesta indicaron que el precio de los insumos y en particular, el costo de los fertilizantes es el principal problema al que se enfrentan los productores. El problema se agudiza porque no se realiza un análisis del suelo previo a la fertilización y sin considerar la disponibilidad de nutrientes y la demanda del cultivo. Un 72,5 % de los productores usan los fertilizantes formulados, con poca frecuencia usan abonos orgánicos, microorganismos benéficos, residuos de cosecha y abonos verdes. Las variedades CP 72-086, ITV 92-1424 y MY 55-14 se cultivan con mayor frecuencia, y los productores identifican la presencia de enfermedades fúngicas en las variedades CP 72-086, ITV 92-1424. En conclusión, para reducir la fertilización química en el cultivo de la caña de azúcar es necesario considerar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, aplicar prácticas agrícolas con un sistema de rotación de cultivos, para el control de las enfermedades y el uso de las variedades que se cultivan en el estado de Morelos, México.

Keywords

Sugarcane; chemical fertilizer; biological fertilizer; fungal diseases.

Abstract

The Morelos state, Mexico, is renowned for its sugar industry. However, the information on the current state of sugarcane crop management is scarce and was the subject of this study. For this, a survey was designed and applied to a sample of 195 sugarcane producers who represent to the nine municipalities in which 74.0 % of sugarcane is grown in the in the Morelos state, Mexico. The survey data indicated that the main trouble for producers is the high cost of fertilizers, exacerbated mainly by the lack of soil analysis before fertilization, without examining nutrient availability and crop demand. The 72.5 % of producers use formulated fertilizers based on the variety and municipality, with infrequent use of organic fertilizers, beneficial microorganisms, crop residues, and green manures. The most commonly cultivated sugarcane varieties are CP 72-086, ITV 92-1424, and MY 55-14; and the producers identified in the CP 72-086, ITV 92-1424 varieties the presence of fungal diseases. In conclusion, to reduce chemical fertilization in the sugarcane crop, it is necessary to consider the physical, chemical and biological properties of the soil, and apply agricultural practices with a crop rotation system, for the control of diseases and the use of varieties grown in the Morelos state, Mexico.

Introducción

El estado de Morelos en México posee suelos fértiles, con un clima cálido subhúmedo, lluvias en verano, una temperatura media anual de 21,5 °C y no se presentan heladas. El promedio de las precipitaciones anuales es de 900 mm [1] con disponibilidad de agua subterránea. La calidad físico-química del agua en las fuentes de abasto superficiales o subterráneas utilizadas para el riego, influye en la calidad del suelo y el rendimiento del cultivo de caña de azúcar [2].

La caña de azúcar se cultiva en 20 de los 36 municipios del estado de Morelos y los municipios de Amacuzac, Ayala, Cuautla, Jojutla, Mazatepec, Puente de Ixtla, Tlaltizapán, Tlaquiltzenango y Yautepec, representan el 74 % de la producción [3]. El rendimiento del cultivo depende del clima [4], sistema de riego [5], tipo de suelo y fertilización [6], con la aplicación de un sistema integrado de nutrición vegetal basado en el uso de fertilizantes químicos, abonos orgánicos, residuos de cosecha, biofertilizantes y abonos verdes [7]; además el rendimiento depende de las variedades y las enfermedades [8]. Las enfermedades fúngicas reducen el rendimiento y la producción del cultivo entre un 20 y 40 % [9]. Las enfermedades se asocian al sistema de fertilización que establece el productor y los cultivos con que se rota la caña de azúcar (10). Asimismo, la fertilización química y el uso de algunas variedades persisten por períodos prolongados. Por lo cual, para proponer alternativas en el manejo integrado del cultivo de la caña de azúcar se realizó un diagnóstico del manejo de la fertilización, del uso de las variedades y del manejo de las enfermedades de la caña de azúcar en el estado de Morelos, México.

Metodología

El cuestionario de la encuesta se diseñó en la plataforma Google Forms, consistió en 24 preguntas de opción múltiple y contempló los siguientes aspectos: a) datos generales y experiencia del productor, b) problemática del cultivo, c) prácticas del manejo del suelo y la fertilización, d) variedades que se usan y e) tácticas para el manejo de enfermedades fúngicas. De un total de 36 municipios que constituyen el estado de Morelos, México se seleccionaron los nueve municipios que representan el 74,0 % de la producción de caña de azúcar [3]. Los municipios fueron Ayala, Tlaquiltzenango, Amacuzac, Yautepec, Cuautla, Jojutla, Tlaltizapán de Zapata, Mazatepec y Puente de Ixtla. La encuesta se aplicó de septiembre a noviembre de 2022 a 195 productores que estuvieron activos para las zafras 2021-2022 y 2022-2023. Los 195 productores representan una muestra de un total de 5982 productores registrados en el Padrón de Beneficiarios de Producción para el Bienestar de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Este tamaño de muestra tiene un margen de error del 7 % a un nivel de confianza del 95 %.

Los datos cualitativos se codificaron en categorías, con valores del 1 al 5 y los datos se concentraron en una base de datos de Excel. Para el análisis de frecuencia y los gráficos de contingencia de asociación entre la fertilización química y rotación de cultivos con las variedades de mayor rendimiento, se utilizó el software IBM SPSS Estadística para Windows, versión 24.

Resultados

Características generales de los productores encuestados

El 81,4 % de los productores fueron de los municipios de Ayala, Tlaquiltzenango, Amacuzac, Yautepec y Cuautla; y el 16,5 % de los productores fueron de los municipios de Jojutla, Tlaltizapán de Zapata, Mazatepec y Puente de Ixtla. El 25,6 y 74,4 % de los productores son del sexo femenino y masculino, respectivamente. El 36,1 % de los productores tienen un nivel educativo superior, el 28,4 % cuenta con un nivel educativo medio superior, 27,3 % con una educación básica, el 5,7 % realizó un posgrado y el 2,6 % no tiene estudios. El 25,2 % de los productores tienen más de 60 años, 54,6 % tiene de 41 a 60 años, el 18,6 % tiene de 20 a 40 años y un 1,5 % tiene menos de 20 años. En relación con la experiencia de los productores en el cultivo, el 43,3 % de los productores tiene 10 o menos años de experiencia, el 28,4 % de 11 a 20 años y 14,4 % de 21 a 30 años de experiencia.

Problemática de los productores

La problemática principal que indicaron los productores fue el precio de los insumos (56,4 % mucho), seguida de los problemas fitosanitarios (51,3 % regular), contar con un sistema de riego (41,0 % regular), la posibilidad de obtener un financiamiento para la compra de los insumos (33,3 % regular) y contar con la asesoría técnica que se requiere para el manejo del cultivo (31,3 % regular). Dentro de los insumos, la compra de fertilizantes representó el mayor gasto para los productores (74,9 % mucho), y en menor proporción, los herbicidas, insecticidas, el riego y los fungicidas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Problemática y jerarquía de gastos de los productores de caña de azúcar en el estado de Morelos, México (n=195).

Categorías	Problemática de productores (%)			
	Mucho	Regular	Poco	Nada
Precio de insumos	56.4	27.7	11.8	4.1
Problemas fitosanitarios	19.0	51.3	27.2	2.5
Riego del cultivo	16.4	41.0	25.2	17.4
Financiamiento para insumos	27.2	33.3	27.2	12.3
Asesoría para el manejo	20.0	31.3	24.1	24.6
Jerarquía de gastos de los productores (%)				
Fertilizantes	74.9	21.5	2.6	1.0
Fungicidas	30.3	34.9	24.6	10.2
Insecticidas	39.0	43.1	16.4	1.5
Herbicidas	43.1	45.1	9.2	2.6
Riego	19.0	41.5	36.4	3.1

Fertilización del cultivo

El tipo de suelo es un factor que determina su fertilidad y el análisis de sus características es de interés para diseñar una fertilización adecuada. El suelo *Vertisol* predomina en los nueve municipios del estado de Morelos donde se aplicó la encuesta a los productores. Sin embargo, los datos de la encuesta indicaron que el 75,8 % de los productores no realizan un análisis de suelo antes de aplicar fertilizantes; mientras que el 24,2 % de los productores que realizan un análisis de suelo, no utiliza los resultados para fertilizar. Para establecer la fertilización, el 54,4 % de los productores no considera la disponibilidad de nutrientes en el suelo, ni la demanda del cultivo, el 25,4 % de los productores toma en cuenta la demanda de nutrientes de la caña de azúcar y su disponibilidad en el suelo, y el 20,2 % de los productores refiere que a veces los considera para realizar la fertilización.

El 90,7 % de los productores indicó que la fertilización química es la principal vía para garantizar los nutrientes que demanda el cultivo. Mientras que el 47,7 % de los productores aplica abonos orgánicos, el 26,6 % emplea microorganismos benéficos, el 19,2 % utiliza residuos de la cosecha y el 2,8 % usa los abonos verdes para mejorar la fertilidad del suelo (Figura 1). Entre los fertilizantes químicos que usan los productores, la aplicación de la fórmula cañera (18 N – 4,5 P₂O₅ - 3 K₂O) predomina con el 36,5 % de los productores y el 28,6 % de ellos la refuerza con fósforo y potasio. Las mezclas que elaboran los propios productores se aplican con una frecuencia de 27,5 %; mientras que las fórmulas de N-P-K, 20-10-10 y 20-15-10 son las que menos se usan (Figura 1).

A nivel estatal, los abonos orgánicos que se usan son el estiércol (33,2 %), el lixiviado de lombriz (28,3 %), la compost (24,9 %), la cachaza (18,3 %) y la lombricomposta (14,6 %) (Figura 1). Sin embargo, un 38% de los productores no aplica abonos orgánicos. El 54,4 % de los productores indicó que no utilizan microorganismos benéficos en el cultivo, pero los productores que los aplican muestran una tendencia de usar hongos del género *Trichoderma* y micorrizas, y las bacterias de los géneros *Bacillus* y *Azospirillum* (Figura 1).

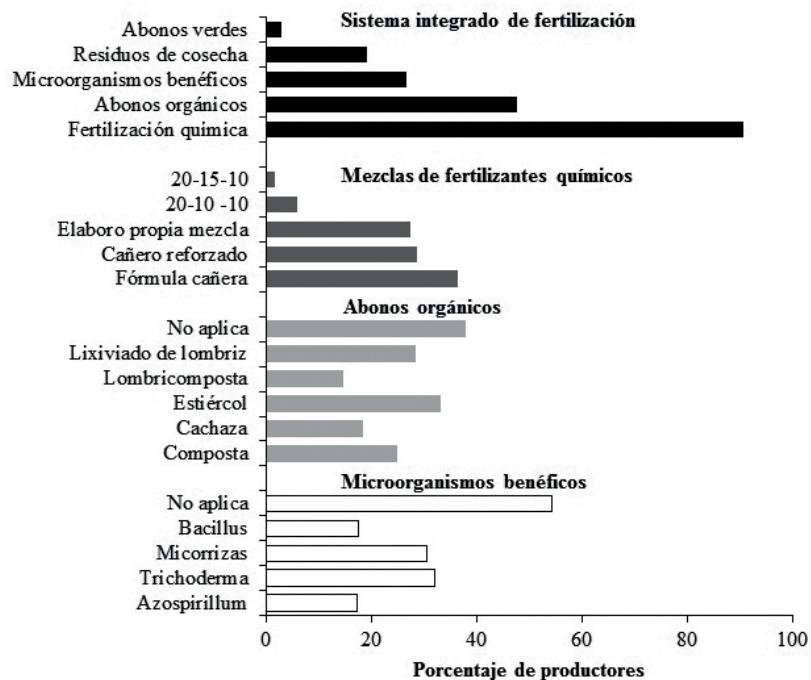


Figura 1. Sistemas de fertilización de la caña de azúcar en el estado de Morelos, México.

Principales variedades de caña de azúcar que se cultivan

En el estado de Morelos, el 90,5 % de los productores cultivan las variedades CP- 72-2086, ITV 92-1424 y MY 55-14; mientras que un 9,5 % de los productores cultivan las variedades ATEMEX 9640, MEX 80-1410 y LT MEX 96-9. En los municipios de Ayala y Tlaquiltenango, la variedad CP- 72-2086 es la que más se cultiva con 63,1 % y 54,1 % respectivamente, seguida por las variedades ITV 92-1424 y MY 55-14. Mientras que, en los mismos municipios, los productores no cultivan las variedades LT MEX 96-9 y ATEMEX 9640. En contraste, en el municipio de Amacuzac, un 60,9 % de los productores cultivan la variedad ITV 92-1424. En el municipio de Yautepec, un 28,6 % de los productores señalan que de manera equitativa cultivan las variedades ATEMEX 9640, CP- 72-2086 y MY 55-14 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Variedades de caña de azúcar que se cultivan en el estado de Morelos y en sus principales municipios.

Variedades	Porcentaje de productores (%)				
	Estado de Morelos	Municipios			
		Ayala	Tlaquiltenango	Amacuzac	Yautepec
CP- 72-2086	46,1	63,1	54,1	30,4	28,6
ITV 92-1424	23,8	15,8	16,7	60,9	14,2
MEX 80-1410	2,6	1,8	2,1	0,0	0,0
ATEMEX 9640	4,3	3,5	0,0	0,0	28,6
MY 55-14	20,6	15,8	22,9	8,7	28,6
LT MEX 96-9	2,6	0,0	4,2	0,0	0,0
No. de encuestados 189	57	48	23	14	

Variedades de caña de azúcar afectadas por enfermedades fúngicas y su manejo

Los productores identifican a la variedad ITV 92-1424 como la más afectada por enfermedades en el estado de Morelos (55,1 %), seguida de las variedades CP 72-2086 (28,7 %), ATEMEX 9640 (7,2 %), LT MEX 96-9 (4,2 %), MEX 80-1410 (3,0 %) y MY 55-14 (1,8 %). En el control de enfermedades fúngicas, el 61,4 % de los productores utiliza fungicidas tales como Sulfato de cobre (13,7 %), Caldo sulfocálcico (13,3 %), Tiofanato de metilo (12,4 %), Carbendazim (6,6 %) y un 15,4 % de los productores utiliza productos diferentes a los mencionados. Es notorio que el 38,6 % de los productores no controla enfermedades.

Manejo del ciclo, fertilización química y rotación de cultivos en las variedades de caña de azúcar CP 72-2086 e ITV 92-1424.

El 30 y 27,5 % de los productores prefieren voltear la caña de azúcar cada cuatro y cinco años, respectivamente. Pero un 33,7 % de los productores voltean la caña de azúcar a los seis o más años, y solo el 8,8 % de los productores lo realiza a los tres años.

En el estado de Morelos, los productores prefieren realizar la fertilización de las variedades CP 72-2086 e ITV 92-1424 con la fórmula cañera, seguida de una mezcla de fertilizantes que elaboran ellos mismos y con la fórmula cañero reforzado. En las dos variedades, los productores usan con menor frecuencia o no las fórmulas 20-10-10 y 20-15-10 (Figura 2).

Los resultados de la encuesta indicaron que, en el estado de Morelos, los productores prefieren descansar el suelo con plantas nativas (43,0 %), seguido de maíz (31,0 %) y jícama (16,0%) y en menor frecuencia con cebolla (6,0 %) y arroz (4,0 %) respectivamente. En las áreas cultivadas con la variedad CP 72-2086 se rota con maíz y se deja descansar el suelo; mientras que en la variedad ITV 92-1424 prevalece la práctica de dejar descansar el suelo seguida de rotar con jícama y maíz. Los cultivos de cebolla y arroz son los menos utilizados por los productores para esta práctica agrícola (Figura 2).

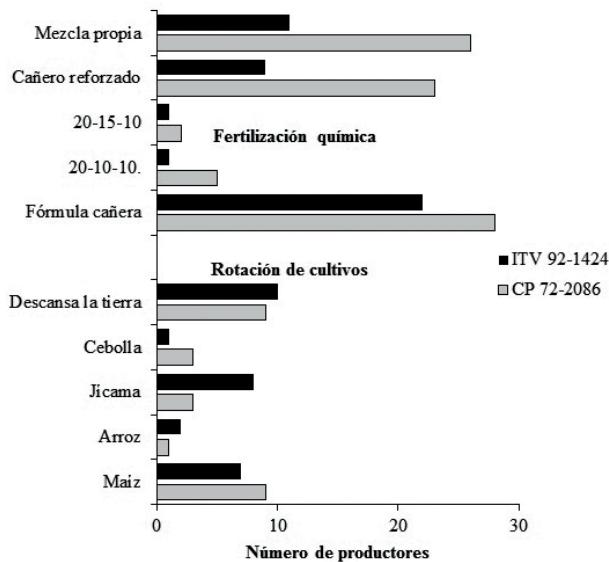


Figura 2. Manejo de las variedades CP 72-2086 e ITV 92-1424 en el cultivo de caña de azúcar en el estado de Morelos, México.

Discusión

En el estado de Morelos, el 98,4 % de los productores realiza fertilización química para el manejo de la nutrición de la caña de azúcar sin tener en cuenta el análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Esta actividad prevalece sobre el uso de abonos orgánicos, residuos de cosecha, biofertilizantes y abonos verdes. Lo cual es una desventaja para los productores de la caña de azúcar, ya que los datos de la encuesta también muestran que el precio de los fertilizantes es la principal problemática que enfrentan los productores. Al respecto, el análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo son la base para el manejo eficiente de la nutrición de la caña de azúcar [11]. El análisis de suelo permite establecer la dosis, el tiempo y la forma de aplicación del fertilizante. Asimismo, se toma en cuenta las concentraciones de los macro y micronutrientes en el suelo, la demanda del cultivo de acuerdo con la etapa fisiológica y el aprovechamiento del fertilizante que se va a utilizar. El establecer la fertilización a partir de un análisis de suelo reduce la aplicación excesiva de fertilizantes químicos, que causan procesos de degradación química del suelo y el antagonismo entre cationes intercambiables [12] [13].

Dentro de los fertilizantes químicos aplicados por los productores, la fórmula cañera es la que utilizan con mayor frecuencia (36,5 %) con respecto a otras mezclas. En forma similar, esta fórmula es la más aplicada por los productores de caña de azúcar en el municipio Tlaquiltenango, en el estado de Morelos [14]. No obstante, presenta un contenido fijo de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), lo que puede conllevar a excesos o déficit de nutrientes en el suelo. Por lo cual, se sugiere realizar análisis de suelo, seleccionar los fertilizantes y tener en cuenta la demanda del cultivo para elaborar el esquema de fertilización.

El uso de abonos orgánicos es aún limitado (47,7 %), lo que sería una alternativa para reducir la aplicación de fertilizantes químicos. Al respecto, los abonos orgánicos permiten una liberación lenta de nutrientes, aumentan la carga microbiana, mejoran la estructura del suelo, incrementan el carbono orgánico del suelo y el rendimiento de la caña de azúcar [15]. Los abonos orgánicos como la vermi-compost, el estiércol de corral y lodo de biogás, aumentaron el C y el N de la biomasa microbiana, el contenido de N y P en el suelo y el rendimiento de la caña de azúcar [16]. En suelos con déficit de P, la aplicación de melaza combinada con la fertilización química mejoró el contenido de materia orgánica, de N y P asimilable, la comunidad bacteriana del suelo y promovió el crecimiento de caña de azúcar [17].

Solamente el 26,6 % de los productores del estado de Morelos usa microorganismos benéficos como biofertilizantes; lo cual podría ser también una alternativa para reducir el uso de fertilizantes químicos. Al respecto, la aplicación de consorcios de *Pseudomonas fluorescens*, *Gluconacetobacter diazotrophicus* y *Trichoderma harzianum* disminuyó hasta en un 50 % la fertilización química de la caña de azúcar [18]. La aplicación de *T. viride*, *Beauveria bassiana* y las bacterias *P. fluorescens* y de los géneros *Azotobacter* y *Gluconacetobacter* combinados con NPK incrementó el rendimiento de la caña de azúcar [19].

Los datos de la encuesta también muestran que en el estado de Morelos es casi nulo el uso de abonos verdes para mejorar la fertilidad de los suelos donde se cultiva la caña de azúcar. Lo cual es un área de oportunidad de investigación y para los productores de caña de azúcar. Debido a que la aplicación de los abonos verdes como *Crotalaria juncea* L. y *Sesbania cannabina* (Retz.) Pers, favorecen la actividad enzimática en el suelo, el número de tallos y el rendimiento de caña de azúcar [20]. Asimismo, el uso de *Crotalaria* spp. incrementa el rendimiento de caña de azúcar en el primer y tercer ciclo de cultivo en comparación con áreas donde se descansó el suelo [21], y su uso reduce la compactación del suelo y por lo cual, se aumenta la velocidad de infiltración en el mismo [22].

Un 46,1 % de los productores del estado de Morelos indicaron que prefieren cultivar la variedad CP 72-2086 que otras variedades de caña de azúcar. La preferencia de cultivar la variedad podría deberse a su alto rendimiento agrícola, su resistencia a plagas y enfermedades, y su adaptación a diferentes tipos de suelos [14]. La variedad CP 72-2086 es considerada de alto rendimiento en la industria azucarera [23], lo cual es significativo, ya que el contenido de sacarosa es un criterio para seleccionar las variedades de caña de azúcar [24].

Por otra parte, las enfermedades causadas por hongos del género *Fusarium* y que se reconocen en la caña de azúcar son la marchitez y el Pokkah Boeng. Al respecto, un 55,1 % de los productores indicaron que la variedad ITV 92-1424 es la que presenta más daño por enfermedades fúngicas que las otras variedades. Asimismo, un 61,4 % de los productores indicó que para el control de las enfermedades en caña de azúcar utiliza los fungicidas a base de sulfato de cobre, caldo sulfocálcico, tiofanato de metilo y carbendazim. Sin embargo, se ha encontrado resistencia a carbendazim por el complejo de *Fusarium* que causa la enfermedad Pokkah Boeng [25] y un factor de predisposición a las enfermedades es la fertilización química desbalanceada, sin un análisis fisicoquímico del suelo [26]. Por lo cual para reducir la aplicación de fungicidas para controlar enfermedades, se recomienda realizar una fertilización química balanceada en base a un análisis del suelo, así como el uso de variedades resistentes de caña de azúcar.

El tiempo en que se voltean la caña de azúcar y los cultivos en rotación que se usan son factores que influyen en el manejo del suelo, la nutrición y el control de las enfermedades en la caña de azúcar. Al respecto el 91,2 % de los productores en el estado de Morelos voltean la caña de azúcar a partir del cuarto año de cultivo y un 43,0 % de los productores prefiere descansar el suelo que realizar la rotación con cultivos como el maíz, la jícama, la cebolla y el arroz. Sin embargo, se reporta que el mayor rendimiento de las variedades CP 72-2086, ITV 92-1424, MEX 79-431 y MY55-14 se alcanza en el primer año de cultivo y disminuye en los cortes sucesivos [14]. Asimismo, la ausencia de rotación de la caña de azúcar con otros cultivos aumenta la acidez, disminuye la fertilidad, la composición microbiana y la actividad biológica del suelo y afecta el rendimiento [27] [28]. En contraste, la rotación de caña de azúcar con pasto *Brachiaria decumbens* incrementó las reservas de N, C total y orgánico, así como minerales asociados a la materia orgánica [29]. La práctica de descansar el suelo con plantas nativas como las leguminosas podría ser una alternativa para los productores de caña de azúcar del estado de Morelos, ya que las leguminosas aportan nutrientes al suelo e incrementan el desarrollo de la macro y microfauna en el ecosistema agrícola donde se cultiva la caña de azúcar [30].

Conclusiones

El diagnóstico de la situación actual del manejo del cultivo de la caña de azúcar en el estado de Morelos, México permitió identificar que la principal problemática de los productores es la fertilización química y el uso limitado de abonos orgánicos, de biofertilizantes y de abonos verdes. Por lo cual se sugiere implementar estrategias para el manejo de la fertilización que consideren las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, aplicar prácticas agrícolas con un sistema de rotación de cultivos, para el control de las enfermedades y el uso de las variedades que se cultivan en los principales municipios productores de caña de azúcar.

Agradecimientos

EJPT recibió beca para estancia posdoctoral de Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT). DMA recibió beca para realizar estudios de doctorado de CONAHCyT y del programa de Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI-IPN). AJP, MRM y GSJ son becarios de Estímulo al Desempeño de los Investigadores (EDI) y de la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFAA) del IPN.

Referencias

- [1] INEGI, "Clima. Morelos Org.mx.", <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mor/territorio/clima.aspx?tema=me&e=17>.
- [2] M. Manzoor *et al.*, "Optimizing Sugarcane Growth, Yield, and Quality in Different Ecological Zones and Irrigation Sources Amidst Environmental Stressors", *Plants*, vol. 12, núm. 20, 2023, doi: 10.3390/plants12203526.
- [3] SIAP, "Anuario Estadístico de la Superficie y la Producción Agrícola. Estado de Morelos y Municipios. Caña de azúcar." Consultado: el 21 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- [4] R. R. Verma, T. K. Srivastava, y P. Singh, "Climate change impacts on rainfall and temperature in sugarcane growing Upper Gangetic Plains of India", *Theor Appl Climatol*, vol. 135, núm. 1, pp. 279–292, 2019, doi: 10.1007/s00704-018-2378-8.
- [5] N. P. Cardozo, R. de Oliveira Bordonal, y N. La Scala, "Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency", *J Clean Prod*, vol. 204, pp. 861–871, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>.
- [6] T. M. S. Sattolo, E. Mariano, B. N. Boschiero, y R. Otto, "Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by land use change and successive nitrogen fertilization of sugarcane", *Agric Ecosyst Environ*, vol. 247, pp. 63–74, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.005>.
- [7] S. Udayakumar, K. Baskar, B. Bhakiyathu Saliha, y C. Jemila, "Chemical Science Review and Letters Impact of Integrated Nutrient Management on Soil Fertility and Nutrient Uptake of Ratoon Sugarcane", *Chem Sci Rev Lett*, vol. 6, núm. 21, 2017.
- [8] P. D. Riajaya *et al.*, "Growth and Yield Potential of New Sugarcane Varieties during Plant and First Ratoon Crops", *Sustainability*, vol. 14, núm. 21, 2022, doi: 10.3390/su142114396.
- [9] W.-F. Li *et al.*, "Occurrence and damage of epidemic fungal diseases in middle and late stages of sugarcane growth in Yunnan Province of China", *Eur J Plant Pathol*, vol. 164, núm. 3, pp. 353–364, 2022, doi: 10.1007/s10658-022-02566-y.
- [10] D. Chen *et al.*, "Dynamic changes in soil fungal communities and functional groups in response to sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen fertilizer application", *Biol Fertil Soils*, vol. 59, núm. 4, pp. 363–378, 2023, doi: 10.1007/s00374-023-01709-5.
- [11] Cairo-Cairo P, Diaz-Martin B, y Rodriguez-Urrutia A, "Soil quality indicators in Vertisols under sugarcane", *Arch Agron Soil Sci*, vol. 63, núm. 11, pp. 1477–1488, 2017, doi: 10.1080/03650340.2017.1289372.
- [12] A. F. Martíni, G. P. Valani, R. S. Boschi, R. C. Bovi, L. F. Simões da Silva, y M. Cooper, "Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review", *Soil Tillage Res*, vol. 204, p. 104751, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104751>.
- [13] J. Prasara-A, S. H. Gheewala, T. Silalertruksa, P. Pongpat, y W. Sawaengsak, "Environmental and social life cycle assessment to enhance sustainability of sugarcane-based products in Thailand", *Clean Technol Environ Policy*, vol. 21, núm. 7, pp. 1447–1458, 2019, doi: 10.1007/s10098-019-01715-y.

- [14] E. E. Hernández-Andrade, C. A. Ortiz Solorio, Ma. del C. Gutiérrez Castorena, E. V. Gutiérrez Castorena, y P. Sánchez Guzmán, "Manejo local de los suelos cañeros en Tlaquiltengo, Morelos, México.", *Revista de Geografía Agrícola*, núm. 61, pp. 85–102, dic. 2018, doi: 10.5154/r.rga.2018.61.14.
- [15] S. K. Sinha, Jha C K, Kumar V, y Pandey S S, "Yield and soil organic carbon pool in relation to soil fertility of sugarcane (*Saccharum* species hybrid complex) plant-ratoon system under integrated nutrient management", *Indian Journal of Agronomy*, vol. 6, núm. 1, pp. 25–30, 2017.
- [16] T. K. Srivastava et al., "Effect of bio-manures on soil quality, cane productivity and soil carbon sequestration under long-term sugarcane (*Saccharum officinarum*) plant - Ratoon system in Indian sub-tropics", *Indian Journal of Agricultural Sciences*, vol. 88, núm. 11, pp. 1696–1703, nov. 2018, doi: 10.56093/ijas.v88i11.84902.
- [17] Q. Wu et al., "Combined Chemical Fertilizers with Molasses Increase Soil Stable Organic Phosphorus Mineralization in Sugarcane Seedling Stage", *Sugar Tech*, vol. 25, núm. 3, pp. 552–561, 2023, doi: 10.1007/s12355-022-01196-2.
- [18] S. K. Shukla et al., "Soil quality parameters vis-a-vis growth and yield attributes of sugarcane as influenced by integration of microbial consortium with NPK fertilizers", *Sci Rep*, vol. 10, núm. 1, p. 19180, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-75829-5.
- [19] S. K. Shukla, V. P. Jaiswal, L. Sharma, A. P. Dwivedi, y M. Nagargade, "Integration of Bio-products and NPK Fertilizers for Increasing Productivity and Sustainability of Sugarcane-Based System in Subtropical India", *Sugar Tech*, vol. 25, núm. 2, pp. 320–330, 2023, doi: 10.1007/s12355-022-01182-8.
- [20] Mambu S et al., "Effect of green manure application on soil enzyme activity and nutrient dynamics in a sugarcane field of Kitadaito, Okinawa, Japan.", *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, vol. 52, núm. 4, pp. 315–324, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.jircas.go.jp>
- [21] W. Zegada-Lizárrazu et al., "The effects of integrated food and bioenergy cropping systems on crop yields, soil health, and biomass quality: The EU and Brazilian experience", *GCB Bioenergy*, vol. 14, núm. 5, pp. 522–538, 2022, doi: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12924>.
- [22] M. Ferneda, F. E. Furlan, T. Qualharello, F. F. Putti, G. H. G. Costa, y R. A. M. Uribe, "Influência da adubação verde na infiltração de água e na resistência a penetração do solo sob cultivo rotacionado com cana-de-açúcar e sorgo sacarino", *Irriga*, vol. 27, núm. 4, pp. 843–855, 2022, doi: 10.15809/irriga.2022v27n4p843-855.
- [23] M. Munir, M. K. Baloch, S. Afghan, A. K. Baloch, y M. M. Hashim, "Productivity-based evaluation of elite sugarcane cultivars for sustainable sugar production", *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, vol. 9, núm. 3, pp. 323–334, 2017, doi: 10.3920/QAS2015.0824.
- [24] J. Reyes-Hernández, R. Torres-De Los Santos, H. Hernández-Torres, V. Hernández-Robledo, E. Alvarado-Ramírez, y S. Joaquín-Cancino, "Yield and quality of seven varieties of sugarcane in El Mante, Tamaulipas", *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, vol. 13, núm. 5, pp. 883–892, 2022.
- [25] S. Xu et al., "Molecular characterization of carbendazim resistance of *Fusarium* species complex that causes sugarcane pokkah boeng disease", *BMC Genomics*, vol. 20, núm. 1, p. 115, 2019, doi: 10.1186/s12864-019-5479-6.
- [26] T. Lian et al., "Impact of intercropping on the coupling between soil microbial community structure, activity, and nutrient-use efficiencies", *PeerJ*, vol. 2019, núm. 2, 2019, doi: 10.7717/peerj.6412.
- [27] M. Tayyab, Z. Yang, C. Zhang, W. Islam, W. Lin, y H. Zhang, "Sugarcane monoculture drives microbial community composition, activity and abundance of agricultural-related microorganisms", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, núm. 35, pp. 48080–48096, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-14033-y.
- [28] Z. Pang et al., "Continuous Sugarcane Planting Negatively Impacts Soil Microbial Community Structure, Soil Fertility, and Sugarcane Agronomic Parameters", *Microorganisms*, vol. 9, núm. 10, 2021, doi: 10.3390/microorganisms9102008.
- [29] B. E. Schiebelbein, R. de O. Bordonal, C. E. P. Cerri, D. M. da S. Oliveira, y M. R. Cherubin, "Mineral-associated and particulate organic matter in aggregates as a proxy for soil C changes in pasturesugarcane land use transitions", *Rev Bras Cienc Solo*, vol. 47, pp. 1–19, jul. 2023, doi: 10.36783/18069657rbcs20220103.
- [30] L. C. Barbosa et al., "Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil", *Soil Tillage Res*, vol. 195, p. 104383, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104383>.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Evaluación de la digestión anaeróbica de las aguas residuales de baja carga en una y dos etapas en escala de laboratorio

Evaluation of anaerobic digestion of low-concentration wastewater in one and two stages at laboratory scale

Erick Javier Centeno-Mora¹, María Mercedes Rodríguez-Salina²

Fecha de recepción: 16 de mayo, 2024

Fecha de aprobación: 3 de setiembre, 2024

Centeno-Mora, E; Rodríguez-Salina, M.M. Evaluación de la digestión anaeróbica de las aguas residuales de baja carga en una y dos etapas en escala de laboratorio. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 25-37.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i1.7080>

- 1 Escuela de Ingeniería Civil y Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible, Universidad de Costa Rica. Costa Rica
 erick.centenomora@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8806-0355>
- 2 Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Costa Rica
 maria.rodriguezsalina@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0001-5012-8112>

Palabras clave

Digestión anaerobia; biogás; generación de energía; tratamiento de aguas residuales; sostenibilidad ambiental; biorreactores.

Resumen

Este artículo aborda la creciente necesidad de métodos eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en Costa Rica, centrándose específicamente en la digestión anaeróbica en dos etapas de aguas residuales con baja concentración de materia orgánica, tanto para aguas residuales ordinarias como para efluentes sintéticos. Para ello se evaluó la digestión anaeróbica de agua residual poco concentrada en reactores anaeróbicos con medio de soporte, en escala de laboratorio. Se comparó el comportamiento de la digestión anaeróbica en una y dos etapas para agua residual ordinaria y sintética (glucosa), monitoreando diversos parámetros de los sistemas, incluida eficiencia de remoción de materia orgánica, pH, alcalinidad, potencial Redox y el potencial de producción de biogás. Los resultados revelaron que, para efluentes de rápida biodegradabilidad como la glucosa, la digestión anaeróbica de aguas residuales en dos etapas ofrece ventajas significativas, como mayor estabilidad del proceso y un incremento en la producción de biogás. Sin embargo, al tratar aguas residuales ordinarias, se encontraron desafíos que indican la necesidad de investigaciones adicionales para afinar el proceso. La digestión en dos etapas mostró ser menos conveniente para estas aguas debido a la estabilidad ya lograda en un solo reactor y la complejidad añadida de operar dos etapas. En conclusión, el estudio subraya el potencial de la digestión anaeróbica de dos etapas en el tratamiento de aguas residuales de baja concentración orgánica, particularmente para sustancias rápidamente biodegradables, y señala áreas para futura investigación y optimización del proceso.

Keywords

Anaerobic digestion; Biogas; Energy generation; Wastewater treatment; Environmental sustainability; Bioreactors.

Abstract

This article addresses the growing need for efficient and sustainable methods for wastewater treatment in Costa Rica, with a specific focus on two-stage anaerobic digestion of low-concentration wastewater, for both municipal wastewater and synthetic effluents. The anaerobic digestion of low-concentration wastewater was evaluated in anaerobic reactors with a support medium at a laboratory scale. The behavior of anaerobic digestion in one and two stages for municipal and synthetic (glucose) wastewater was compared, monitoring various system parameters, including organic matter removal efficiency, pH, alkalinity, Redox potential, and biogas production potential. The results revealed that for rapidly biodegradable effluents such as glucose, anaerobic digestion in two stages offers significant advantages, such as greater process stability and increased biogas production. However, challenges were encountered in treating ordinary wastewater, indicating the need for further research to refine the method. Two-stage digestion was found to be less convenient for these waters due to the stability already achieved in a single reactor and the added complexity of operating two stages. In conclusion, the study highlights the potential of two-stage anaerobic digestion in the treatment of low organic concentration wastewater, particularly for rapidly biodegradable substances, and points out areas for future research and process optimization.

Introducción

La gestión y el tratamiento de las aguas residuales es un desafío en muchos países desarrollados, como en el caso de Costa Rica. En este país, según investigaciones recientes [1], [2], [3], menos del 20% de las aguas residuales ordinarias (municipales) es colectado por medio de un alcantarillado sanitario y tratado en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Por este motivo, desde el 2015 el gobierno publicó un documento que llamó Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (PNSAR) [4], proponiendo un plan de acción para solucionar esta problemática al 2045. Según la PNSAR, al 2030 se captaría y trataría el 100% de las aguas residuales de las zonas densamente pobladas y, al 2045, el 100% de las zonas en las que no sea posible emplear soluciones de saneamiento individual. Esto equivaldría a cubrir más del 80% de la población con sistemas de alcantarillado sanitario y PTARs. El desafío es grande, y la búsqueda de soluciones tecnológicas sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales es clave para el cumplimiento de estas ambiciosas metas.

En este sentido, los procesos de tratamiento biológico por medio de reactores anaeróbicos han probado ser una opción muy atractiva para el tratamiento de las aguas residuales ordinarias y las especiales para climas tropicales o calientes, como el de Costa Rica [5], [6], [7], [8]. Entre las ventajas de estos sistemas sobre las tecnologías aeróbicas como los lodos activados se encuentran [9], [10]: la menor generación de lodo, no requerimiento de aireación mecanizada para el proceso biológico, generación de biogás, el cual puede ser aprovechado energéticamente, simplicidad operacional y menores costos operativos en general.

Según se observa en la Figura 1, la digestión anaeróbica de la materia orgánica es un proceso complejo, compuesto por distintas etapas. De forma general, la literatura suele separar el proceso completo en cuatro fases [10]: hidrólisis, que consiste en la conversión de materia orgánica compleja (proteínas, carbohidratos, lípidos) en compuestos de cadena simple (aminas, azúcares, ácidos grasos); acidogénesis, para convertir los compuestos de cadena simple en ácidos orgánicos; acetogénesis, para convertir los ácidos orgánicos en hidrógeno y acetato; y la metanogénesis, que convierte el acetato e hidrógeno en metano, el cual es un gas energéticamente aprovechable. Distintos tipos de microorganismos se encargan de realizar el proceso completo en un complejo ecosistema microbiano que tiene las condiciones ambientales adecuadas en los reactores anaeróbicos.

Un tema que ha generado interés recientemente [11], [12] es el de separar el proceso en dos partes, dejando las primeras tres fases en un reactor (reactor hidrolítico o de acidificación), y la metanogénesis en un segundo reactor. Esto facilita la operación de cada reactor en condiciones ambientales más adecuadas para los distintos tipos de microorganismos involucrados en el proceso completo, siendo que las arqueas metanogénicas (encargadas de la fase metanogénica) suelen ser más sensibles a cambios en el entorno (pH, temperatura, presencia de compuestos tóxicos, entre otros) [10]. Algunas ventajas de este modo de operación reportadas en la literatura [11], [13], [14], [15] incluyen una mayor estabilidad del proceso, mayor generación de biogás y mayor eficiencia para la remoción de materia orgánica.

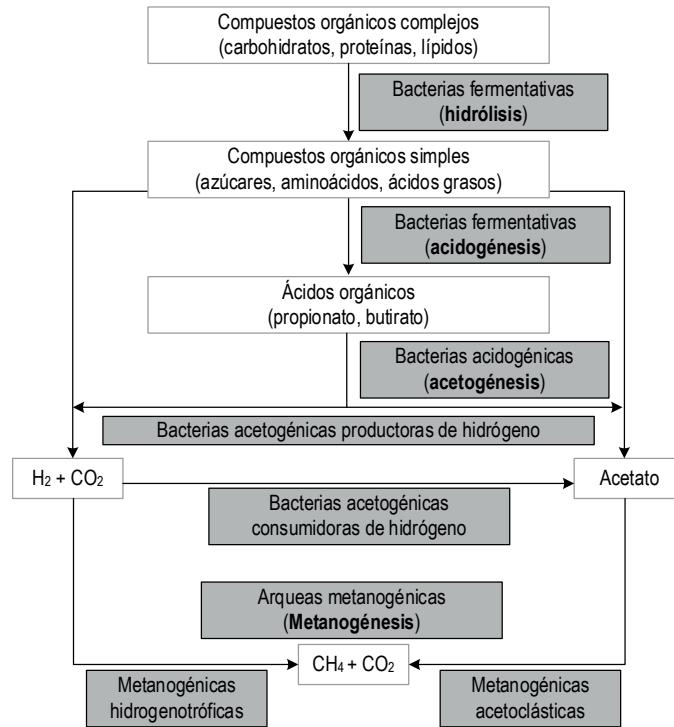


Figura 1. Etapas de la digestión anaeróbica

Adaptado de Chernicharo (2007) [10]

Esta opción ha sido explorada principalmente para sistemas de digestión anaeróbica de sólidos y para efluentes de alta concentración de materia orgánica, y han sido poco explorados a nivel experimental (en Costa Rica y en la literatura internacional) para sistemas con baja carga orgánica, como lo son los sistemas de aguas residuales ordinarias. Un estudio más detallado de esta opción podría señalar nuevas vías para la optimización de los procesos de digestión anaeróbica de las aguas residuales de baja carga, con el fin de extender su aplicación en la región (y en zonas de clima caliente, en general), y promover una gestión más sostenible de las aguas residuales.

Desde esta perspectiva, este artículo tiene por objetivo evaluar experimentalmente la digestión anaeróbica en dos etapas de las aguas residuales de baja carga orgánica en escala de laboratorio, con el fin de analizar su factibilidad para el tratamiento de aguas residuales en Costa Rica.

Materiales y métodos

Sistema experimental para digestión anaeróbica

La fase experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Para las pruebas se consideró un reactor anaeróbico en dos etapas con medio de soporte en escala de laboratorio. La Figura 2 muestra el montaje experimental de los reactores anaeróbicos utilizados en este trabajo.

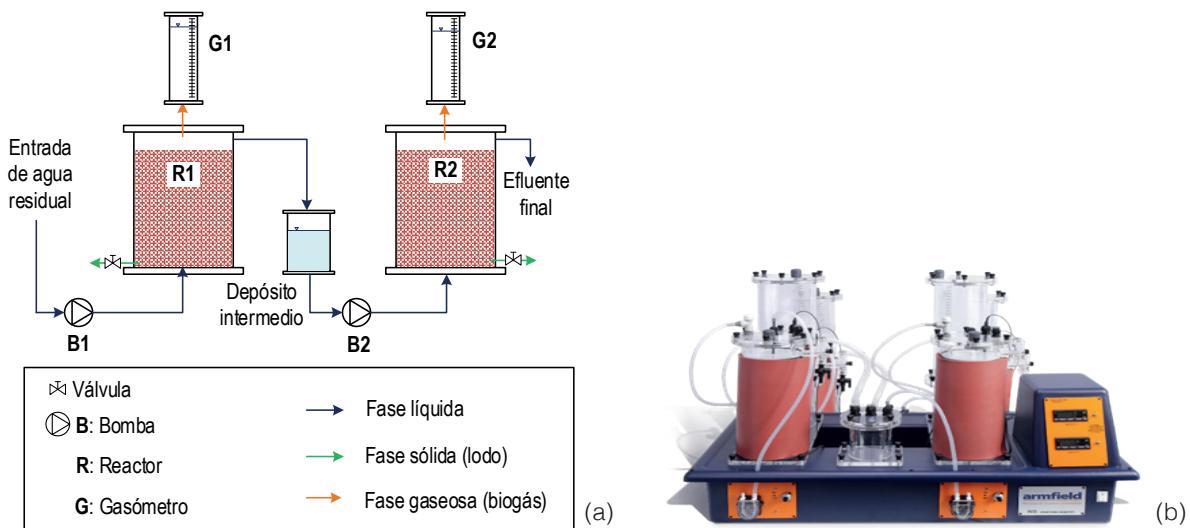


Figura 2. Reactor anaeróbico en dos etapas con medio de soporte: (a) Esquema de funcionamiento; (b) Fotografía del sistema [16]

Según se muestra en la Figura 1, el sistema experimental consistió en dos reactores anaeróbicos de 5L con medio de soporte (bio-esferas de plástico de 25mm de diámetro). Los sistemas fueron alimentados por medio de dos bombas peristálticas a caudal constante (una bomba por reactor), utilizando agua residual sintética y agua residual ordinaria. Se operaron en una etapa y en dos etapas, utilizando el depósito intermedio para la alimentación del reactor 2. El volumen de biogás fue medido por desplazamiento de volumen de agua, por medio de gasómetros del mismo equipo. Las muestras de lodo fueron tomadas por medio de válvulas de bola de cada reactor. Los reactores fueron operados a temperatura ambiente, la cual varió de aproximadamente 22 a 26°C durante todo el experimento.

Parámetros de control del experimento y métodos analíticos

Durante el experimento se realizaron análisis de pH, temperatura, alcalinidad, potencial Redox (ORP), DQO y sólidos suspendidos totales en el agua residual, tanto a la entrada como a la salida de los reactores anaeróbicos (Figura 1). También se realizaron análisis de sólidos totales y volátiles en el lodo. Se siguieron los procedimientos establecidos en el Standard Methods versión 2012 [17]. El caudal de agua residual fue medido volumétricamente, aforando las bombas peristálticas, y el volumen generado de biogás fue medido cada hora durante la puesta en marcha de los experimentos, por medio del gasómetro de las unidades. Debido a dificultades en el equipo, y para facilitar la comparación entre las etapas de la investigación, la producción de biogás se normalizó por medio de un índice de generación de biogás, siendo el valor de 1.0 el correspondiente a la mayor producción de biogás reportado en el experimento.

El Cuadro 1 muestra los análisis de laboratorio realizados y los métodos analíticos que fueron seguidos.

Cuadro 1. Análisis de laboratorio realizados durante el experimento

Parámetro	Unidades	Muestra	Frecuencia de medición	Método analítico
pH	-	Agua	Diaria	Sonda multiparámetro Hannah
Temperatura	°C	Agua	Diaria	Sonda multiparámetro Hannah
Potencial Redox	mV	Agua	Diaria	Sonda multiparámetro Hannah
Alcalinidad total	mgCaCO ₃ /L	Agua	Diaria	HACH 8203 – titulación con ácido sulfúrico
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	Agua	Dos veces por semana	APHA5220D
Humedad, sólidos totales y sólidos volátiles	%	Lodo	Inicio y final del experimento	APHA2540G

La Eficiencia de remoción de materia orgánica (DQO) fue calculada según se muestra en la Ecuación 1.

$$E = \frac{DQO_E - DQO_{F,S}}{DQO_E} \cdot 100\%$$

En donde, E : eficiencia de remoción de DQO; DQO_E : DQO total del agua residual a la entrada del sistema; $DQO_{F,S}$: DQO filtrada a la salida (filtro de 1.2 μm) del sistema. Se decidió considerar la DQO filtrada a la salida para no considerar el posible arrastre de sólidos del reactor (DQO soluble a la salida), reflejando la eficiencia real de remoción de la materia orgánica del sistema.

Fases de la investigación

La investigación constó de tres fases experimentales, según se detalla en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Fases experimentales de la investigación

Fase	Modo de operación de proceso de digestión anaeróbica	Tipo de agua residual / sustrato	TRH del reactor (h)	Número de repeticiones
1	Una única etapa	Sintética / glucosa	50	9
2	Una única etapa	Agua residual ordinaria	50	9
3	Dos etapas: R ₁ : fase acidogénica y acetogénica R ₂ : fase metanogénica	Sintética / glucosa	R ₁ : 25 R ₂ : 50	9

Es necesario mencionar que, durante la investigación, no fue posible forzar la digestión en dos etapas para el agua residual ordinaria, según se analiza en la sección de resultados. Según se observa en el Cuadro 2, para cada etapa se realizaron 9 repeticiones con el fin de obtener resultados representativos de las condiciones evaluadas. Estas repeticiones consistieron en ciclos de operación diarios en los cuales se monitoreó el sistema durante 7 horas continuas.

Agua residual de alimentación del sistema y lodo de inoculación

El agua residual ordinaria (Fase 2 de la investigación) fue tomada de una planta de tratamiento de aguas residuales de un residencial (caudal promedio de 230 m³/d) con reactor anaeróbico. El agua se tomó después del tratamiento preliminar (tamizado de 4mm y desarenado) y antes de la alimentación en el reactor anaeróbico. En el caso del agua residual sintética (Fase 1 y Fase 2), se preparó una mezcla con glucosa para una concentración teórica de DQO de 600 mg/L (condiciones de baja carga, similares a las del agua residual ordinaria). Se agregó un volumen de aproximadamente 5-10 mL de agua residual ordinaria por litro de efluente sintético para proveer los macronutrientes necesarios para el proceso biológico.

Con respecto al lodo utilizado en los reactores anaeróbicos a escala de laboratorio, se consideró inocularlos con lodo de un reactor UASB que trataba aguas residuales ordinarias. El lodo fue previamente tamizado (1mm) para retirar los sólidos de mayor tamaño, según se observa en la Figura 3.



Figura 3. Tamizado del lodo anaeróbico antes de la inoculación de los reactores de laboratorio

Para cada reactor de 5 L se colocaron 700 mL de lodo anaeróbico con las características del Cuadro 3. Se completó el volumen con agua residual ordinaria hasta los 5L y se dejó el sistema sin alimentación durante 24 horas a temperatura ambiente antes de iniciar con la carga progresiva de los reactores. Posteriormente el sistema fue puesto en marcha a un caudal bajo de 0.81 L/d (TRH de 6.2 d) con agua residual sintética (glucosa) hasta lograr condiciones estables de operación. A partir de esta condición se ejecutaron las fases experimentales del trabajo.

En el Cuadro 3 se muestra las principales características fisicoquímicas del agua residual y el lodo utilizados en este estudio.

Cuadro 3. Características del agua residual y lodo anaeróbico de inoculación

Tipo	Origen	Características	Observaciones
Agua residual sintética	Agua destilada con glucosa y micronutrientes	DQO medida: 597 a 657 mg/L	Sin sólidos suspendidos.
Agua residual ordinaria	PTAR de aguas residuales ordinarias	DQO medida: 399 a 505 mg/L	Sólidos suspendidos típicos de aguas residuales ordinarias (200-250 mg/L)
Lodo de inoculación	Lodo de reactor UASB tamizado en PTAR de aguas residuales ordinarias	ST: 2.4 % SV: 1.6 % SV/ST: 0.65	Volumen por reactor de 700 mL

DQO: demanda química de oxígeno; SST: sólidos suspendidos totales; ST: sólidos totales; SV: sólidos volátiles.

Según se observa en el Cuadro 3, tanto el agua residual ordinaria como los lodos presentaron condiciones típicas según la literatura técnica [10], [18]. Vale la pena mencionar que la relación SV/ST del lodo al final del experimento fue muy similar a la inicial, con un valor de 0.69.

Resultados y discusión

Digestión anaeróbica en una etapa

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos para el reactor anaeróbico en una etapa operando con sustrato artificial (glucosa).

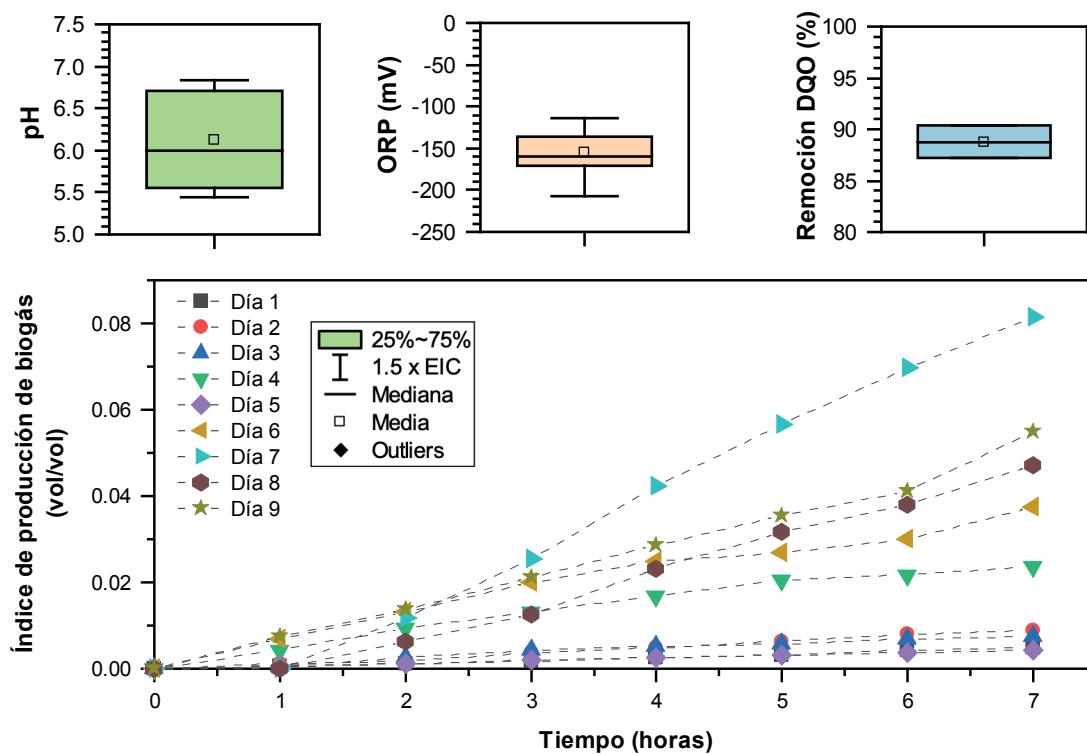


Figura 4. Operación del reactor anaeróbico en una etapa para el sustrato artificial (glucosa)

Según se observa en la Figura 4, para esta fase se presentaron condiciones inestables en relación con la producción de biogás, generando muy poco en los primeros días. Esto se debió a que en los primeros días se tuvo una acidificación del reactor anaeróbico, evidenciada por caída del pH hasta aproximadamente 5.5. Se debió suministrar alcalinidad adicional (NaOH) para recuperar el sistema. Para los días siguientes, dosificando alcalinidad, fue posible mantener un pH menos ácido y promover la generación de gas. Para esta fase no fue posible medir la alcalinidad del efluente final debido a que era inferior al límite de medición del método analítico. Esto demuestra que la generación de ácidos orgánicos (presumiblemente acetato en el caso de la glucosa) era intensa durante esta fase, y que para mantener la carga aplicada en el tiempo es necesario suministrar alcalinidad adicional al sistema. Por otro lado, la remoción de DQO fue elevada, en torno de 88%, con una condición de ORP típica para condiciones anaeróbicas (valores negativos, cercanos a -150mV).

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para el reactor anaeróbico en una etapa operando con agua residual ordinaria.

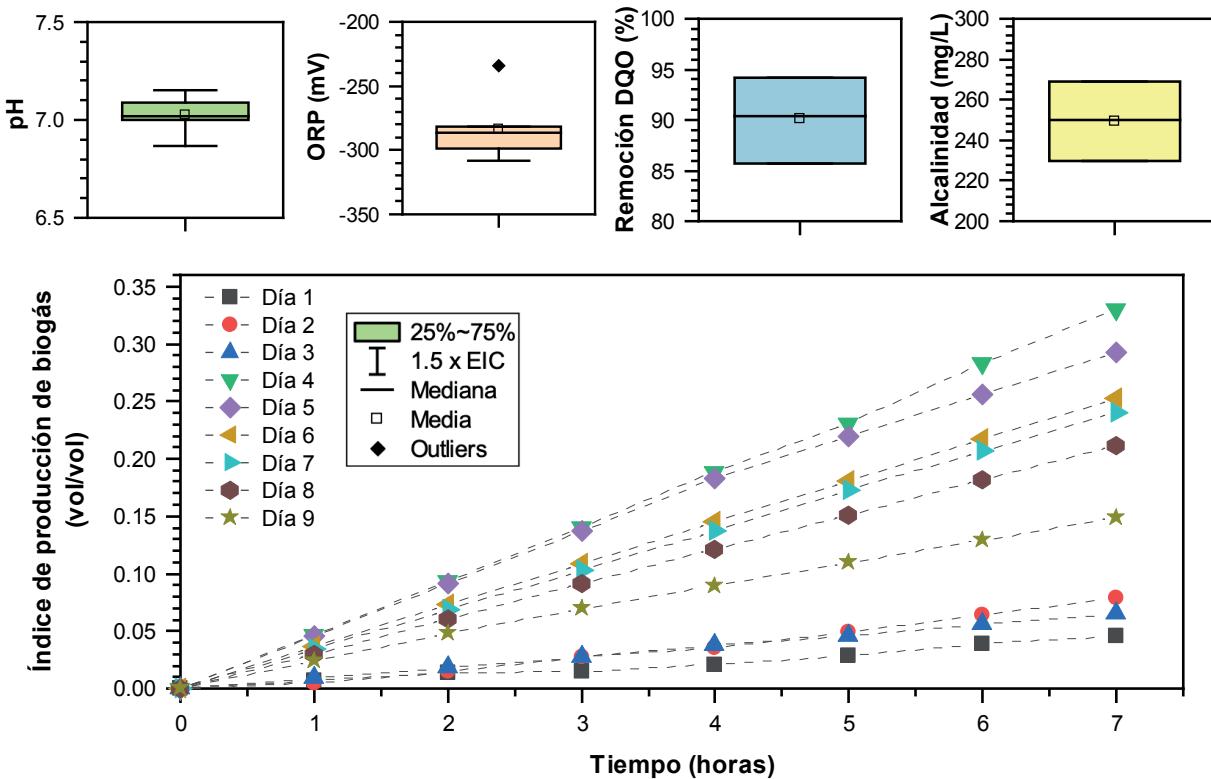


Figura 5. Operación del reactor anaeróbico en una etapa para el agua residual ordinaria

La Figura 5 muestra que esta condición fue muy distinta a la del agua residual sintética. En primer lugar, aunque sí hubo una dispersión importante en la generación de gas, la producción de gas alcanzó, de forma general, valores más elevados para el agua residual ordinaria (hasta 3-4 veces mayor). En este caso no fue necesario suministrar alcalinidad adicional, la presente en el agua residual ordinaria fue suficiente para mantener un pH cercano al neutro, y la alcalinidad del efluente no se agotó (valores cercanos a los 250 mgCaCO₃/L fueron registrados). Además, una remoción de DQO muy similar, de aproximadamente 90% fue observada, con valores de ORP menores (-300 mV), lo que indica condiciones reductoras más intensas, que propician el proceso de digestión anaeróbica.

En relación con las diferencias observadas entre ambos sustratos, considerando que las dos aguas residuales tenían una DQO similar (baja concentración, o típica de las aguas residuales ordinarias), es posible afirmar que éstas se debieron a la naturaleza del sustrato evaluado. Con respecto a este punto, la literatura científica [19], [20] cataloga a las aguas residuales ordinarias como un sustrato complejo, de biodegradación más compleja que los sustratos simples, como la glucosa. En particular, en el caso de la glucosa, la fase de hidrólisis no es necesaria, por ser un sustrato soluble, lo que acelera su conversión en ácidos orgánicos, consume la alcalinidad disponible y baja rápidamente el pH [10]. Por este motivo, en el caso de la glucosa, la operación en una etapa fue inestable, a pesar de que la carga orgánica era baja.

Digestión anaeróbica en dos etapas

En la Figura 6 se muestra el resultado obtenido para la fase de digestión anaeróbica en dos etapas del sustrato artificial (glucosa). El primer reactor (R_1) fue operado como un sistema de fase acidogénica y acetogénica, mientras que el segundo reactor (R_2) fue operado para la fase metanogénica, aprovechando el efluente acidificado de R_1 .

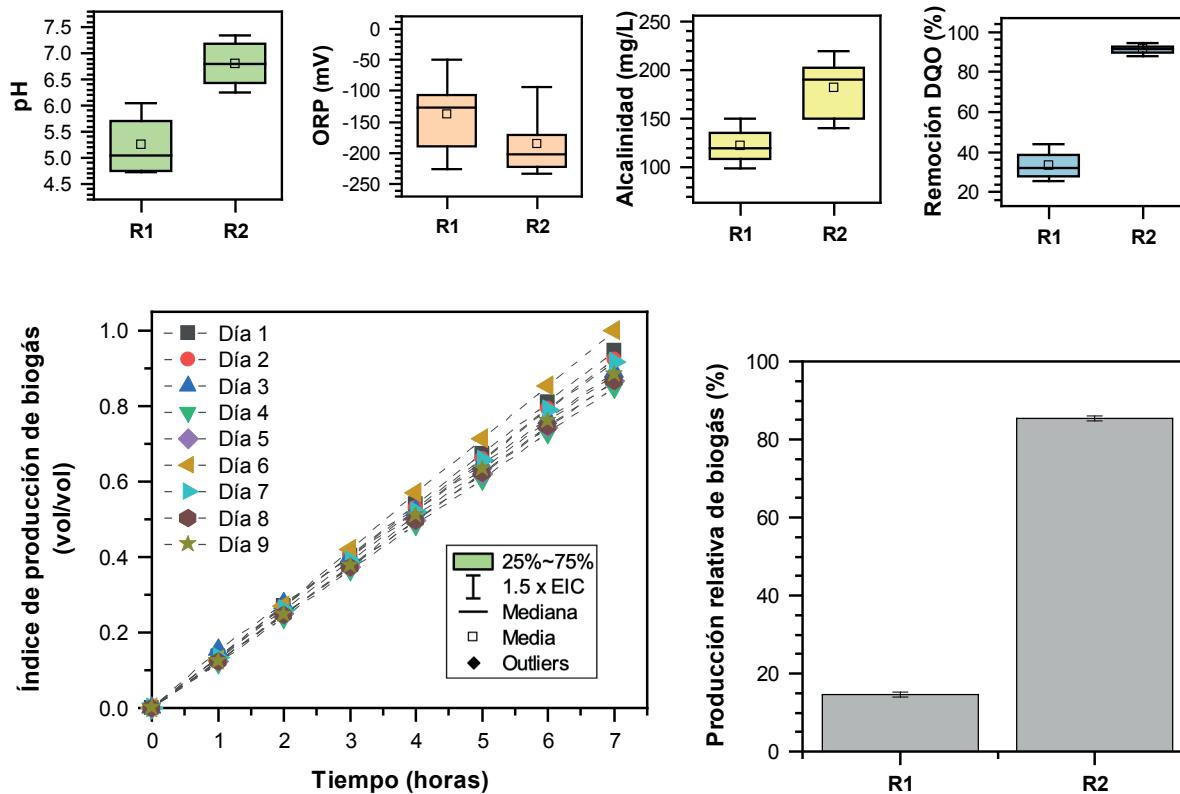


Figura 6. Operación del reactor anaeróbico en dos etapas para el agua residual sintética (glucosa)

En la Figura 5 se observa el desempeño de ambos reactores. Las diferencias entre el pH, alcalinidad y remoción de DQO muestran que ambos reactores operaron en fases distintas, siendo que en R_1 se generaron ácidos orgánicos (bajo pH, menor alcalinidad, menor remoción de DQO), mientras que estos ácidos fueron convertidos en biogás en R_2 (producción de 85% del biogás en este reactor). Además, este modo de operación fue el que más biogás generó (hasta 9 y 3 veces el de la fase 1 y 2, respectivamente), y fue muy consistente (presentó muy poca variabilidad) a lo largo de las 9 repeticiones.

En ese sentido, para la glucosa, que es un sustrato fácilmente biodegradable de rápida acidificación, la operación en dos etapas fue muy ventajosa, permitiendo aumentar la producción de gas y estabilidad del sistema, aun cuando la concentración en términos de materia orgánica era baja. Este resultado es consistente con lo observado con efluentes de elevada carga orgánica reportados en la literatura [11], [12], [21]. También, para efluentes sintéticos de baja carga, Guerrero et al. (2009) [22] llegaron a una conclusión similar, para temperaturas entre 21°C y 24°C.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, no fue posible operar el sistema en dos etapas para el agua residual ordinaria, debido a que el reactor R₁ no se acidificó a pesar de distintos esfuerzos (suministro de ácido sulfúrico para pre-acidificar, recirculación del efluente). Según Álvarez et al. (2008) [14], para la acidificación del agua residual ordinaria se requieren TRH menores a los probados, de unas 2 horas, incluso a temperaturas más bajas que las típicas de un clima tropical. Sin embargo, considerando la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica de las aguas residuales ordinarias en una etapa (Figura 5) vale la pena preguntarse sobre la necesidad de contar con dos etapas en este caso, según resultados obtenidos en otras investigaciones con agua residual municipal en climas tropicales o calientes [15], [20].

Análisis comparativo del desempeño según el tipo de agua residual

Con el fin de facilitar la comparación entre las fases experimentales evaluadas, la Figura 7 presenta la generación promedio de gas en función de la carga orgánica promedio aplicada en el sistema anaeróbico, para una y dos etapas, agua residual sintética y ordinaria. El gráfico muestra la desviación estándar de los datos experimentales, para las 9 repeticiones de cada fase experimental.

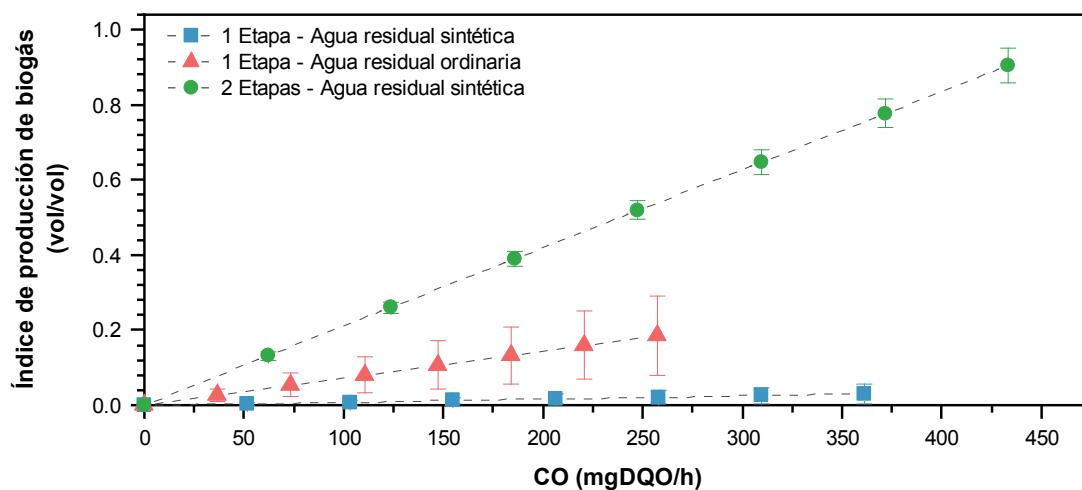


Figura 7. Producción relativa de biogás normalizada con respecto a la carga orgánica aplicada en el sistema

Según se observa en la Figura 7, para condiciones normalizadas de carga orgánica aplicada, queda clara la diferencia de generación de gas entre las distintas fases del experimento. El efluente sintético fácilmente biodegradable produjo muy poco biogás cuando el sistema se operó en una etapa (inestabilidad), pero fue el que produjo mayor cantidad de biogás cuando se operó en dos etapas. El agua residual ordinaria produjo una cantidad de biogás intermedia entre ambas condiciones, aproximadamente un 30% de la del agua residual sintética en dos etapas.

No fue posible encontrar en la literatura técnica estudios que compararan de forma integral la digestión en una y dos etapas de las aguas residuales ordinarias y sintéticas de baja carga como en este trabajo. Sin embargo, revisando algunos estudios que evaluaron el proceso de digestión anaeróbica en dos etapas [14], [15], [21], [22], es posible confirmar que, para efluentes rápidamente biodegradables (como la glucosa), la digestión en dos etapas es ventajosa (aun cuando el agua posee baja carga orgánica) para aportar estabilidad al proceso y aumentar la generación energética; mientras que para las aguas residuales ordinarias, de lenta biodegradación, esta condición no sería tan ventajosa (aunque es posible), debido a que

la digestión en una etapa ya es estable, y una posible mayor producción energética podría no compensar la mayor complejidad operacional. Esto es particularmente importante para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, donde la simplicidad operacional es un aspecto clave para garantizar la sostenibilidad de los sistemas de tratamiento.

Conclusiones y/o recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, es posible concluir que la digestión anaeróbica en dos etapas es ventajosa para el agua residual sintética, la cual estaba compuesta por glucosa de fácil biodegradación. La separación en dos etapas permitió una estabilidad del proceso que maximizó la generación de biogás. Por el contrario, la digestión en una sola etapa de la glucosa produjo los resultados más inestables y la menor producción de biogás, a pesar del suministro de alcalinidad. Esto se debe a la fácil biodegradación de la glucosa que genera ácidos orgánicos muy rápidamente y consume la alcalinidad presente en el medio. Para las aguas residuales ordinarias el comportamiento fue muy distinto. En este caso, para las condiciones experimentales evaluadas, no fue posible operar el sistema en dos etapas, y la operación en una sola etapa fue muy estable. Esto se debería a la complejidad del sustrato, compuesto por diferentes tipos de materia orgánica, que no son tan rápidamente transformados en ácidos orgánicos. Esto permite que la misma alcalinidad del agua residual permita mantener condiciones de pH estables. En ese sentido, para este tipo de aguas residuales no parece necesario la operación en dos etapas, considerando el aumento en la complejidad del sistema.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de las personas operadores y administradoras de las plantas de tratamiento de aguas residuales que facilitaron el acceso al agua residual ordinaria utilizada en este trabajo, particularmente al señor Josué Martínez y al Ing. Ernesto Jiménez de AyA.

Este trabajo fue desarrollado dentro del marco del proyecto C3608 de la Universidad de Costa Rica, con financiamiento de la Vicerrectoría de Investigación de esta Universidad.

Referencias

- [1] E. Centeno Mora y A. Murillo Marín, "Tipología de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales ordinarias instaladas en Costa Rica", Revista de Ciencias Ambientales, vol. 53, núm. 2, pp. 97–110, 2019, doi: 10.15359/rca.53-2.5.
- [2] E. Centeno Mora, N. Cruz Zúñiga, y P. Vidal Rivera, "Tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad", vol. 34, núm. 1, pp. 2215–2652, 2024, doi: 10.15517/ri.v34i1.55222.
- [3] D. Mora y C. F. Portuguez, "Agua para uso y consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2019: brecha al 2023", San José, 2020.
- [4] AYA, MINAE, y MINSA, Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales. San José, 2016.
- [5] C. A. L. Chernicharo, J. B. van Lier, A. Noyola, y T. Bressani Ribeiro, "Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges", Rev Environ Sci Biotechnol, vol. 14, núm. 4, pp. 649–679, 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9377-3.
- [6] J. B. van Lier, F. P. van der Zee, C. T. M. J. M. J. Frijters, y M. E. Ersahin, "Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment", Rev Environ Sci Biotechnol, vol. 14, núm. 4, pp. 681–702, 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9375-5.
- [7] E. Centeno Mora y A. Murillo Marín, "Comparación de tecnologías para el tratamiento sostenible de aguas residuales ordinarias en pequeñas comunidades de Costa Rica", Revista Ingeniería, vol. 30, núm. 1, pp. 1–24, 2019, doi: 10.15517/ri.v30i1.38898.

- [8] V. Solano Ramírez, E. Centeno Mora, y P. Vidal Rivera, "Cierre de ciclos de nutrientes y generación de energía por medio del tratamiento anaerobio de las aguas residuales ordinarias : Estudio de caso en Las Juntas de Abangares", Revista de Ciencias Ambientales, vol. 57, núm. 1, pp. 1–29, 2023, doi: <https://doi.org/10.15359/rca.57-1.1>.
- [9] C. A. L. Chernicharo y T. Bressani, Eds., Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation. IWA Publishing, 2019. doi: 10.2166/9781780409238.
- [10] C. A. L. Chernicharo, Anaerobic Reactors, vol. 6, núm. 0. Belo Horizonte, Brasil: IWA Publishing, 2007. doi: 10.2166/9781780402116.
- [11] G. Srisowmeya, M. Chakravarthy, y G. Nandhini Devi, "Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 119. Elsevier Ltd, el 1 de marzo de 2020. doi: 10.1016/j.rser.2019.109587.
- [12] E. Holl et al., "Two-stage anaerobic digestion: State of technology and perspective roles in future energy systems", Bioresource Technology, vol. 360. Elsevier Ltd, el 1 de septiembre de 2022. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127633.
- [13] E. Holl et al., "Two-stage anaerobic digestion: State of technology and perspective roles in future energy systems", Bioresour Technol, vol. 360, p. 127633, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127633>.
- [14] J. A. Álvarez, E. Armstrong, M. Gómez, y M. Soto, "Anaerobic treatment of low-strength municipal wastewater by a two-stage pilot plant under psychrophilic conditions", Bioresour Technol, vol. 99, núm. 15, pp. 7051–7062, oct. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2008.01.013.
- [15] M. Halalsheh et al., "Treatment of strong domestic sewage in a 96 m³ UASB reactor operated at ambient temperatures: Two-stage versus single-stage reactor", Bioresour Technol, vol. 96, núm. 5, pp. 577–585, mar. 2005, doi: 10.1016/j.biortech.2004.06.014.
- [16] Armfield, "Instruction Manual: Anaerobic Digester W8". Armfield UK, Londres, Reino Unido, 2015.
- [17] AWWA, Standard methods for the examination of water and wastewater, 22a ed. Washington D.C: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), 2012.
- [18] M. von Sperling, Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos, Fourth. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014.
- [19] G. Lettinga, My Anaerobic Sustainability Story. Wageningen: LeAF, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.br/books?id=k4wYzQEACAAJ>
- [20] G. Zeeman y G. Lettinga, "The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level", Water Science and Technology, vol. 39, núm. 5, pp. 187–194, mar. 1999, doi: 10.2166/wst.1999.0238.
- [21] V. T. Mota y M. Zaiat, "Two- vs. single-stage anaerobic reactors: Evaluation of effluent quality and energy production potential using sucrose-based wastewater", Water Science and Technology, vol. 78, núm. 9, pp. 1966–1979, dic. 2018, doi: 10.2166/wst.2018.470.
- [22] L. Guerrero et al., "Performance evaluation of a two-phase anaerobic digestion process of synthetic domestic wastewater at ambient temperature", J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng, vol. 44, núm. 7, pp. 673–681, jun. 2009, doi: 10.1080/10934520902847794.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Viabilidad en la implementación de ASETs en la zona indígena Nai Teri, para la generación de energía eléctrica sostenible

Implementation viability of ASETs at Nai Teri indigenous sector, for renewable electric energy generation

María Jesús Amador¹, Brandon Obregón², José Ambrozic³, Gustavo Richmond–Navarro⁴

Fecha de recepción: 2 de abril, 2024

Fecha de aprobación: 18 de agosto, 2024

Amador, M.J; Obregón, B; Ambrozic, J; Richmond-Navarro, G. Viabilidad en la implementación de ASETs en la zona indígena Nai Teri, para la generación de energía eléctrica sostenible. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 38-47.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7092>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
✉ orozcoamador1010@gmail.com
✉ <https://orcid.org/0009-0009-1966-146X>

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
✉ bobregon@estudiantec.cr
✉ <https://orcid.org/0009-0008-2311-2132>

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
✉ jambrozic@ujpii.ac.cr
✉ <https://orcid.org/0009-0009-4097-8023>

4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
✉ grichmond@tec.ac.cr
✉ <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Palabras clave

ASETs; reserva indígena; Nai Teri; red eléctrica; desarrollo; acceso; energía renovable.

Resumen

Esta investigación pretende dar visibilidad a la realidad que enfrentan las personas que viven en sectores no cubiertos por la red eléctrica nacional, en particular en regiones remotas y dentro de reservas indígenas. Se considera como caso de estudio la región de Nai Teri. Se muestra el impacto que representa para la calidad de vida de estas personas la ausencia del recurso eléctrico, la manera en que sus costumbres y su vida cotidiana se desarrolla sin electricidad. Por otra parte, se menciona como se verían beneficiadas estas personas con la aplicación de tecnologías de generación de energía a base de recursos disponibles en la zona. Se investiga sobre tipos de ASEts (Tecnologías de Energía Sostenible Apropiadas) que se podrían implementar y su viabilidad de acuerdo con transporte, instalación y mantenimiento. Se concluye que la manera más factible de producir energía en la zona es mediante paneles solares, para los cuales es necesario una inversión por parte de terceros, sea gubernamental, de la compañía eléctrica que cubre el sector o capitales privados.

Keywords

ASETs; indigenous reserve; Nai Teri; electrical grid; development; access; renewable energy.

Abstract

This research aims to give visibility to the reality faced by people living in sectors not covered by the national electrical grid, particularly in remote regions and within indigenous reserves. The Nai Teri region is contemplated as a case study. It shows the impact that the absence of electrical resources represents on the quality of life of these people and how their customs and daily lives develop without electricity. On the other hand, it is mentioned how these people would benefit from the application of energy generation technologies based on resources available in the area. Research is carried out on types of ASEts (Appropriate Sustainable Energy Technologies) that could be implemented and their viability according to transportation, installation, and maintenance. It's concluded that the most feasible way to produce energy in the area is through solar panels, for which investment by third parties is necessary, whether government, electric companies, or private capital.

Introducción

El desarrollo energético de un país está estrechamente ligado a la calidad de vida y bienestar de sus habitantes [1]. La energía eléctrica juega un papel fundamental en el acceso a servicios básicos cotidianos como iluminación, agua limpia, cocción de alimentos, funcionamiento de equipos médicos y de comunicación, así como el desarrollo socioeconómico y sostenible de una región. Por tanto, la energía genera un impacto positivo en la salud y comodidad de las personas, facilitando el quehacer de las tareas cotidianas, la prevención de enfermedades, mejora la atención médica inmediata en casos de emergencias, y el acceso a educación y trabajo, entre otros beneficios.

En Costa Rica, la cobertura de la red eléctrica nacional abastece de energía eléctrica a un 99,4 % de los hogares costarricenses por medio de energías provenientes de fuentes renovables. Las fuentes empleadas en la matriz eléctrica, para el año 2020, se pueden desglosar de la siguiente manera: hidroeléctrica 63,2 %, geotérmica 15,4 %, eólica 19,7 %, biogás 1,58 % y solar 0,10 %, con un restante 0,07 % mediante fuentes no renovables [2].

Según [3] - [4], durante el año 2023 se estima que 10,127 viviendas ocupadas no gozan de electricidad en Costa Rica. Esta población generalmente se encuentra en áreas alejadas y de difícil acceso, en su mayoría territorios indígenas del país donde la única forma de llegar es caminando, por varios kilómetros, en terrenos complicados [5] - [6].

A partir del último censo poblacional desarrollado en 2022, se estima que las viviendas sin acceso a electricidad corresponden al 0,55 % de los hogares costarricenses [7]. Con frecuencia no se considera en los planes de expansión energética del país. Esto se debe en gran medida a las dificultades de instalación y mantenimiento de infraestructura eléctrica en estas áreas [8]. Como resultado, esta minoría de población se encuentra directamente afectada por la falta de acceso a la electricidad, enfrentando desafíos significativos en su vida diaria [5].

Un ejemplo de estas regiones es la zona de Nai Teri, ubicada en la Reserva Indígena Cabécar de Alto Chirripó, la cual va a ser el foco de atención de este artículo. Los habitantes de la región han buscado diferentes maneras de generación de energía, aprovechando los recursos que se tienen al alcance, los cuales muchas veces no son eficientes o sostenibles.

¿Qué son los ASETs?

Para solventar las necesidades energéticas de zonas con estas características, es común que los habitantes desarrollen dispositivos y sistemas diseñados para aprovechar los recursos locales y así simplificar las actividades diarias. Estos mecanismos ya existentes, o los que se pueden inventar con estas características, se conocen como ASETs, que son las Tecnologías de Energía Sostenible Apropiadas (por sus siglas en inglés) [9]. Estas tecnologías están adaptadas a las necesidades sociales, económicas y tecnológicas de las comunidades con acceso limitado a la energía, así como a los recursos necesarios para la operación y mantenimiento sostenible de herramientas tecnológicas.

Los ASETs proporcionan soluciones eficaces y asequibles que promueven el desarrollo sostenible al utilizar los recursos naturales disponibles en la zona sin causar impactos ambientales significativos. Además, son diseñadas para poder ser construidas, operadas y mantenidas por personas con conocimiento local [9].

A lo largo del tiempo, se han inventado numerosos tipos de ASETs utilizados para simplificar actividades cotidianas. Estos van desde herramientas operadas manualmente como moledores de granos, sistemas de poleas y cuerdas para elevar cargas pesadas hasta lavadoras de ropa accionadas por pedales [10]. Entre algunos otros ejemplos más modernos se encuentran desde lámparas con paneles solares hasta generadores de energía de uso residencial, como turbinas hidroeléctricas de pequeña escala, aerogeneradores para uso doméstico, biodigestores y paneles solares que suministran la energía demandada para el consumo de una vivienda [6].

En la región de Nai Teri, se pueden encontrar ejemplos concretos de ASETs, como paneles solares. Sin embargo, es común que se utilicen generadores de energía que funcionan con combustibles fósiles, como diésel o gasolina, lo cual no se considera ASETs, ya que dependen de recursos no renovables y proporcionan solo unas pocas horas de energía. A pesar de esto, son una opción más accesible para los habitantes de Nai Teri debido a su facilidad de transporte y precio.

En este documento se comparan tres tipos de generación de energía utilizados en Costa Rica, los cuales pueden adaptarse a un modelo de ASETs a pequeña escala. Estos son: energía eólica, energía solar y biodigestores. Se evaluará la viabilidad de utilizar cada uno de estos métodos para facilitar la generación de energía a largo plazo de manera sostenible en la región, teniendo en cuenta factores como el transporte, la instalación y el mantenimiento.

Metodología

Se realizó una visita al sitio donde se llevó a cabo un reconocimiento de la zona, se evaluó la dificultad para ingresar y se identifica la dispersión geográfica de las familias habitantes de la región de manera visual.

Para tener una idea clara de las condiciones de vida de la comunidad de Nai Teri y su experiencia con el uso de ASETs, se realizaron entrevistas a personas residentes de la zona, entre ellas el director de la escuela Tolok Kichá, de Nai Teri, Reyner David Páez Fernández. Se determinaron los problemas que representa la escasez del recurso eléctrico y el difícil acceso a la zona en su vida cotidiana, y como esto perjudica su desarrollo social y económico.

Se consultó con investigadores en el área de generación de energías renovables, entre ellos profesora Claudia Chávez Villareal y el investigador Jose Ambrozic sobre los procesos que se llevan a cabo para la instalación y mantenimiento algunas tecnologías generadoras de energía a pequeña escala, como biodigestores y paneles solares.

Se comparó la viabilidad que estas tecnologías tienen en regiones con características geográficas, demográficas, climáticas y culturales similares a las de la zona de Nai Teri, para determinar los factores que garantizan su viabilidad y sustentabilidad.

Se analizaron los planes de expansión de energía y legislación vigente que pretenden cubrir mayormente el territorio con este recurso, así como los beneficios que esto tendría para la población de Nai Teri.

Discusión y resultados

Estado actual de la zona

Nai Teri es una región indígena ubicada en la Reserva Indígena Cabécar de Alto Chirripó, en Turrialba de Cartago, a 820 msnm en las coordenadas 9°40'36"N 83°25'45"W. Para ingresar se deben recorrer aproximadamente 100 km desde el centro de la provincia de Cartago dirigiéndose hacia el sector de Turrialba hasta el Río Chirripó, únicamente en vehículo 4x4. Dependiendo de la estación y de las condiciones climáticas, en ocasiones es imposible llegar en vehículo hasta la propia localidad. La escuela de Nai Teri está al otro lado del río Chirripó, el cual se cruza a pie por un puente peatonal.

Las mismas dificultades de ingreso a la zona han sido una limitante para la recolección de datos confiables de fuentes oficiales como lo es el Instituto Nacional de Estadísticas Censos (INEC), donde normalmente se cuenta con acceso a bases de datos con información demográfica sobre la cantidad de población, características de ubicación, núcleos familiares, dispersión geográfica y modos de vida cotidiano. Sin embargo, mediante la visita realizada al lugar e información brindada por el director de la escuela Tolok Kichá de Nai Teri, se estima una cantidad de 16 núcleos familiares que viven en las cercanías de la escuela. Estas familias tienen alumnos activos recibiendo el programa escolar, siendo un total de 34 estudiantes en el centro educativo.

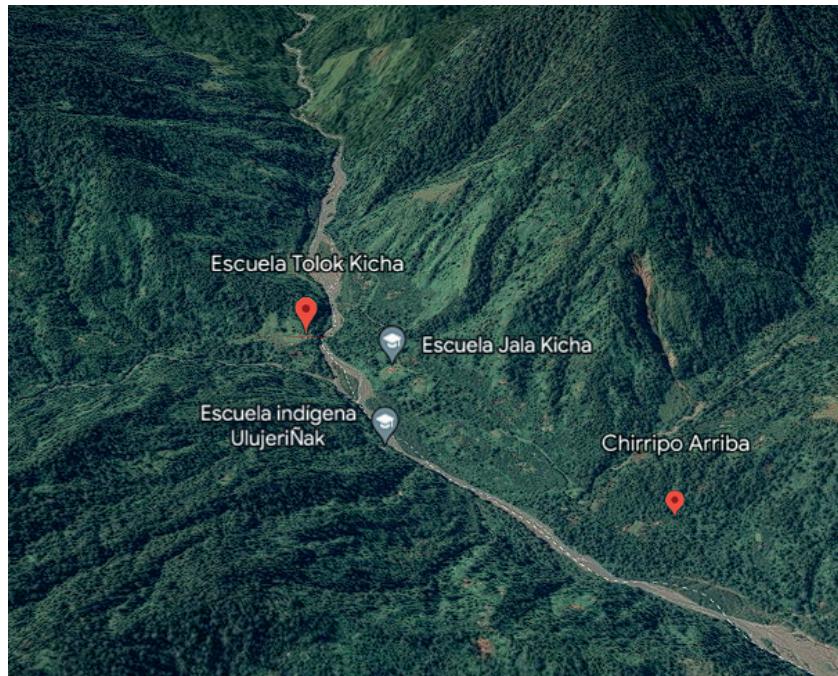


Figura 1. Paisaje de la región Nai Teri. Fuente: [11]

Cada grupo familiar está generalmente constituido por madre y padre de familia, en algunos casos solamente la madre con los niños; con 2 a 5 hijos menores de 12 años, de 1 a 4 adolescentes, 2 mayores de edad o personas adultas mayores, es decir, se estima que cada núcleo familiar está constituido por 8 personas en promedio. Teniendo una población foco aproximada de 144 personas habitantes de Nai Teri.

A su vez, es una región muy amplia y dispersa; se compone por pequeños grupos de 3 a 5 casas, cada una separada 150 m de la otra y cada grupo de casas se encuentra aproximadamente de 1 a 2 km de cercanía; cada grupo de casas puede estar entre 5 a 8 km de la plaza central de Nai Teri, en donde se encuentra la Escuela de Tolok Kichá. Por esta razón los estudiantes y personal de la escuela deben caminar más de una hora para llegar el centro educativo entre caminos y terrenos peligrosos, donde es frecuente enfrentar amenazas como la presencia de serpientes venenosas, cursos de agua y terrenos con riesgo de caídas desde altura. Estas características no solo suponen peligros potenciales, sino que también complicarían y prolongarían significativamente la respuesta a una emergencia, en caso de que esta se presente.

Los hogares de la zona suelen ser construidos de materiales abundantes en el territorio, como hojas de caña brava o bolsas de yute. Existen algunas familias que cuentan con viviendas mejoradas, construidas con madera y techos de lámina con ayuda de los bonos de vivienda provistos por instituciones gubernamentales. Normalmente se cocina con leña y con tres troncos de madera colocados en el suelo dentro de la vivienda; la iluminación del hogar se logra principalmente a través de candelas, lámparas de canfín, o lámparas de celdas solares que algunas familias adquieren por su cuenta para conseguir iluminarse durante las noches. Un elemento esencial en los hogares es la radio, que se utiliza tanto para estar informado como para el entretenimiento, la cual se alimenta de baterías o de celdas solares. La ropa es lavada a mano en los ríos o arroyos y secada al sol. No cuentan con otros aparatos electrónicos como televisor, cocina, refrigerador, licuadora, calentador, lavadora o secadora.

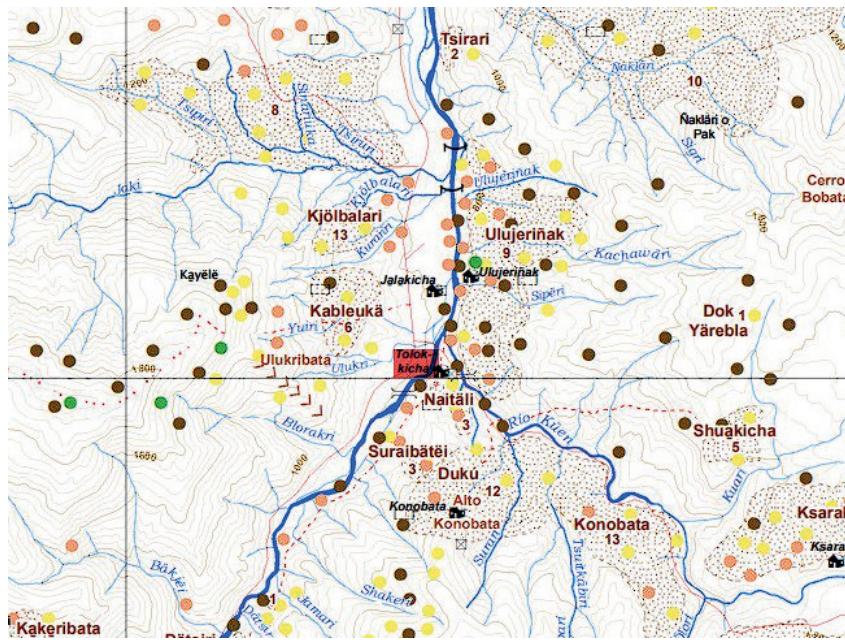


Figura 2. Mapa escolar de la Región. Fuente: [12]

Es costumbre que en los hogares de Nai Teri se utilice cocina de leña dentro de las casas para cocinar sus alimentos, lo cual genera un riesgo a la salud para los miembros de la familia que se encuentran en los hogares realizando las labores domésticas y de crianza mientras respiran el humo ocasionado por el fogón de la cocina, principalmente para las mujeres y niños. Sumado a esto, se cuenta con servicios de emergencias poco inmediatos por la misma dificultad de comunicación y la dificultad de ingresar a la zona, por lo que al realizar una llamada de emergencia tienen que esperar varias horas para que el servicio de emergencia llegue al lugar.

En resumen, se tienen los factores de: iluminación, comunicación, almacenamiento de alimentos, preparación de alimentos, riesgo a la salud, como las principales necesidades. Estas necesidades se apaciguan con la incorporación de equipos de uso doméstico como lo son lámparas LED, refrigeradora, cocina, teléfono, computadoras, los cuales se busca que sean alimentados por ASETs.

Gran parte de la población vive sin electricidad, lo que no representa un obstáculo significativo en su vida diaria. Culturalmente, las personas adultas mantienen una forma de vida más sencilla, sin embargo, es común notar la penetración de la tecnología en la población joven de la zona, ya que cuentan con dispositivos móviles como teléfonos, tablets y computadoras utilizadas para realizar tareas escolares y para entretenimiento, si cuentan con internet.

En el pasado, las escuelas y colegios de la zona solían depender de generadores de energía de combustión interna que funcionaban con gasolina para satisfacer sus necesidades energéticas, como lo es el caso de la escuela Tolok Kichá. La electricidad generada se destinaba principalmente a la iluminación, los enchufes y la conectividad a Internet, elementos esenciales para el entorno educativo. Sin embargo, este sistema tenía sus desafíos. Para mantener un suministro ininterrumpido de electricidad en la semana durante el período lectivo, se requerían al menos dos galones de gasolina por semana. En ausencia de este recurso, las lecciones se veían obligadas a continuar sin iluminación, hasta que se obtuviera nuevamente el combustible, lo que normalmente conllevaba retrasos en el programa educativo. Además de estos inconvenientes, estos generadores también producían un nivel significativo de ruido, lo que afectaba tanto a estudiantes como a personal docente.



Figura 3. Escuela Tolok Kichá. Fuente: [13]

Hasta el año 2019, esta situación ha mejorado gracias a la Fundación Omar Dengo y su proyecto “Educación accesible para todos”, donde se instaló un banco de paneles solares de 8 kW en el centro educativo. Estos paneles no solo proveen la electricidad necesaria para la escuela, incluyendo las 28 computadoras en funcionamiento, sino que también han tenido un impacto beneficioso en toda la comunidad de Nai Teri. Ahora, las familias locales pueden acercarse a la escuela y cargar sus dispositivos personales, lo que les permite mantenerse comunicados durante las noches, llevando estos dispositivos cargados de vuelta a sus hogares. Esta iniciativa ha mejorado significativamente la calidad de vida y la conectividad en la región.



Figura 4. Paneles solares de la Escuela de Tolok Kichá. Fuente: [13]

Comparación de viabilidad en ASETs

Para determinar el consumo de energía promedio de una casa se consideraron datos de placa de equipos domésticos de uso diario convencionales, los cuales ayudarán solventar las necesidades definidas en la sección anterior. Así como equipos que las familias pueden utilizar para facilitar las tareas diarias del hogar como lavadora, microondas, calentador de agua y electrodomésticos.

Considerando que, en promedio, alrededor de 8 personas viven en cada casa, se estima un consumo diario de 10,5 kWh por hogar al día, lo que equivale a 325 kWh al mes [14]. A partir de este dato, se puede calcular la producción de energía requerida para satisfacer las necesidades diarias de electricidad, que incluyen cocinar, electrodomésticos, lavar ropa, ducharse y utilizar dispositivos para actividades como estudiar y el entretenimiento.

A continuación, se ofrece un resumen conciso de las características de instalación, mantenimiento, rendimiento y costos de los ASETs en estudio en relación con el consumo de 10,5 kWh diarios requeridos para abastecer a una vivienda de bajo consumo.

Estos datos se basan en investigaciones bibliográficas y en investigaciones de campo específicas para cada tecnología, además de consultas realizadas a profesionales del área.

En un primer análisis, se considera la opción de implementar biodigestores. Estos son comunes en el país ya que ofrecen una solución viable para áreas remotas, siempre y cuando exista una producción sustancial de desechos orgánicos de origen animal como en granjas, campos de pastoreo o productoras de carne.

Se ha estimado que, con aproximadamente 20 kg de estiércol, generados por cuatro cerdos y cuatro vacas hacinadas, es suficiente para la producción de gas para cocinar en una casa en un día [15]. En Nai Teri es común observar animales como cerdos, cabras, gallinas, vacas y caballos, los cuales en su mayoría permanecen al exterior durante el día alimentándose de pastos de la zona, por lo cual recolectar sus desechos es bastante complicado. Por otro lado, con esta cantidad de desechos se generaría gas solamente para la preparación de alimentos.

Esta tecnología requiere de altos costos iniciales de adquisición e instalación del biodigestor, así como la necesidad de mantenimiento mensual a cargo de técnicos especializados y capacitación para el personal local encargado del buen estado y limpieza de los equipos utilizados, los que hacen que esta opción no sea económicamente viable ni adecuada para la realidad social de la comunidad.

Por otro lado, se evalúa la viabilidad en la instalación de una turbina eólica a pequeña escala. En la investigación titulada “Micro generación de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso.” se determina que, para realizar la instalación adecuada de un aerogenerador, es indispensable estudiar las condiciones de la zona y recopilar datos cruciales, como las velocidades del viento, la altura y niveles de turbulencia [16]. Esto, para seleccionar un aerogenerador que produzca energía eficientemente bajo las condiciones específicas de la zona. Dado esto, la implementación de una turbina eólica representa una significativa inversión económica, y la elección incorrecta basada en cálculos teóricos puede resultar en una ineficiencia para la generación eléctrica [6].

Mediciones realizadas en la estación meteorológica del Tecnológico de Costa Rica determinan que en Cartago la intensidad de turbulencia es alta y la velocidad del viento suele ser baja [17], por lo que la producción de energía no sería alta.

Sin embargo, con los recursos y la información adecuada, es posible identificar una turbina ideal para la región, convirtiéndose en una opción viable capaz de satisfacer las necesidades de energía de las viviendas con un aerogenerador de uso doméstico por casa. Además, estas tecnologías requieren mantenimiento con menor frecuencia que en el caso de los biodigestores, lo que implica costos operativos reducidos a lo largo de su vida útil. Sería una opción más viable, siempre y cuando se realicen en el lugar las investigaciones pertinentes que lo respalden.

Por último, sobre el uso de paneles solares en la zona, es posible conocer el impacto actual que tienen, ya que desde el año 2019 se utilizan en Nai Teri. Estos paneles solares, colocados en los techos de las escuelas de la región, abastecen de energía a los estudiantes durante el

periodo lectivo, y han colaborado con el avance tecnológico que se ha dado en Nai Teri en los últimos años. Esto, mediante las estaciones generadoras de energía ubicadas en las escuelas de la zona, lo que facilita acceso a información, aprendizaje y comunicación entre las personas. Estos paneles fueron instalados por una organización privada, quedando claro lo indispensable que es para el desarrollo de estas zonas los proyectos de instituciones no gubernamentales.

Para las casas de la región también serían una solución atractiva, ya que su instalación no requiere de mayor modificación del entorno, precisa de pocos mantenimientos anuales y es posible generar la potencia demandada para una casa con aproximadamente 17 paneles solares de 2 m² [18] - [19], para una casa de bajo consumo. Esta tecnología también requiere de un costo de inversión elevado, sin embargo, una vez instalados los equipos se mantienen a lo largo del tiempo con pocas intervenciones por mantenimiento. Cabe mencionar que el arreglo de paneles solares propuestos requiere un área aproximada de 34 m² por lo que es necesario contar con el espacio requerido para su instalación, lo cual no representa mayor limitación en la zona.

En Costa Rica, una parte del presupuesto nacional se destina a mejorar la calidad de vida de los habitantes, lo cual está estrechamente vinculado con su acceso a la energía eléctrica. Sin embargo, el actual Plan de Expansión Energética del ICE, donde planean continuar con la cobertura eléctrica hasta el año 2040, no detalla acciones concretas para atender las necesidades energéticas en zonas rurales, específicamente reservas indígenas [8]. Según conversaciones con funcionarios de la institución pública encargada de diseñar estrategias para las minorías, aún se están desarrollando planes específicos para abastecer estas áreas con electricidad. La ayuda de las instituciones públicas es fundamental para implementar tecnologías en estas zonas remotas, o bien, agentes externos al gobierno como los que ya han beneficiado a Nai Teri.

Conclusiones

La zona de Nai Teri presenta desafíos considerables debido a su ubicación remota y condiciones geográficas difíciles. La población se estima en alrededor de 144 personas quienes no cuentan con acceso a todos los servicios básicos y tienen que mantenerse en un modo de vida sencillo. Las limitaciones afectan su calidad de vida, viéndose perjudicada su salud, su acceso a educación, comunicación, trabajo, y desarrollo económico sostenible.

Al comparar tres tipos de ASETs para esta región, se identifican diferencias significativas en cuanto a su viabilidad en la comunidad de Nai Teri. Los biodigestores se descartan debido a la falta de desechos orgánicos suficientes, los altos costos iniciales y la necesidad de mantenimiento especializado. Por otro lado, las turbinas eólicas, requieren de estudios de potencial eólico específicos para determinar puntos adecuados de instalación, los cuales son inexistentes en este momento. Finalmente, los paneles solares, que ya se utilizan en las escuelas de la región, han demostrado ser beneficiosos para la comunidad al brindar acceso a la información y facilitar la comunicación. Para las viviendas, aunque la inversión inicial es alta, los paneles solares requieren menos mantenimiento y pueden generar la potencia necesaria, siempre y cuando haya suficiente espacio para su instalación.

Es fundamental reconocer la situación de las personas que residen en Nai Teri y en otras comunidades indígenas que enfrentan desafíos similares debido a la falta de acceso a electricidad. Es imperativo que el gobierno de Costa Rica y las instituciones como el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), se comprometan a incluir a estas poblaciones vulnerables en sus planes de expansión energética.

Además, la colaboración entre el sector público y privado es esencial para impulsar proyectos que promuevan el progreso continuo en este sentido. Este esfuerzo no solo mejorará la calidad de vida de estas comunidades, sino que también contribuirá al desarrollo sostenible del país en su conjunto.

Referencias

- [1] M. Skare, Y. Quian, Z. Xu y X. Gou, «Energy justice and gaps in sustainable development: A convergence testing and clustering study,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, n° 1, pp. 114-166, 2024.
- [2] E. Durán, A. Víquez, R. Monge y C. Muñoz, Costa Rica: Matriz eléctrica, San José: Instituto Costarricense de Electricidad, 2020.
- [3] Instituto Costarricense de Electricidad, «ICE invertirá ¢23100 millones para llevar electricidad por primera vez a 2670 hogares,» 2024. [En línea]. Available: <https://bit.ly/43A69s6>.
- [4] J. Rivas y F. Solano, «ICE - Índice de Cobertura Eléctrica 2019,» 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/4cDTFUD>.
- [5] G. Richmond, R. Madriz-Vargas, N. Ureña-Sandí, S. Murillo-Rodriguez, V. Chavarría-Castillo, M. Chaves y F. Barrientos Johansson, «Challenges and opportunities for indigenous Community Power research in Costa Rica,» 2nd World Community Power Conference, Bamako - Mali, 2018.
- [6] G. Richmond-Navarro, R. Madriz-Vargas, N. Ureña-Sandí y F. Barrientos-Johansson, «Research Opportunities for Renewable Energy Electrification in Remote Areas of Costa Rica,» *Perspectives on Global Development and Technology*, vol. 18, n° 5-6, pp. 553 - 563, 2019.
- [7] INEC, Encuesta Nacional de Hogares Julio 2022: Resultados Generales, San José: Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2022.
- [8] Instituto Costarricense de Electricidad, «Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2022-2040,» 2023. [En línea]. Available: <https://bit.ly/4ctQi2x>.
- [9] J. Aamodt y B. Feamster, «The role of appropriate sustainable energy technologies (ASETs) as a means for promoting access to energy for all,» de *International Energy and Poverty*, Routledge, 2015.
- [10] L. Guruswamy y N. Doman, «Sustainable Development: Global Poverty, Energy and ASETs,» 2021.
- [11] Google, *Escuela Tolok Kicha - Google Earth*, 2024.
- [12] Central America Indígena Research Team, «Reserva Indígena Cebácar de Chirripó. 1:25,000 and 1:40,000-scale,» The University of Kansas, 2018.
- [13] R. Paéz, Interviewee, *Director de Escuela Tolok Kicha, comunicación privada*. [Entrevista]. 2024.
- [14] Instituto Costarricense de Electricidad, «Guía para ahorrar electricidad en el hogar,» 2022. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3VD7RXY>.
- [15] M. López, «Análisis costo-beneficio para la instalación de un biodigestor modelo rústico en la comunidad de Topiltepec, Municipio de Zitlala, Guerrero, Mexico [Tesis de Licencitatura],» *Instituto Politécnico Nacional*, 2022.
- [16] K. Torres-Castro, C. Torres-Quirós y G. Richmond-Navarro, «Microgeneración de energía eólica en un entorno boscoso en Costa Rica: estudio de caso,» *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, n° 3, pp. 61-69, 2021.
- [17] G. Murillo-Zumbado, G. Richmond-Navarro, P. Casanova-Treto y J. Rojas-Gómez, «Generalidades del recurso eólico en Costa Rica: caso de estudio de la provincia de Cartago,» *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, n° 4, p. 130–145, 2021.
- [18] O. Carmona-López, A. Vidal-Santo, A. Martínez-López, J. Conde y J. Ticono-Magaña, «Estudio de la viabilidad técnica para la implementación de un sistema de autoconsumo eléctrico basado en paneles fotovoltaicos para una vivienda,» *QUID: Investigación, Ciencia y Tecnología*, n° 26, pp. 29-38, 2016.
- [19] O. Hoyos-Gutiérrez y C. Hernández-Mejía, «Estudio de Viabilidad Técnica y Económica para la Implementación de un Sistema de Energía Solar Fotovoltaica de 10 kW, Caso “Hospital Local de Tenerife, Magdalena” [Tesis de maestría],» *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 2017.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Modelado de Redes de Distribución usando ETAP

Distribution Power Grids Modeling using ETAP

Rebeca Solís-Ortega¹, Gustavo A. Gómez-Ramírez², Dario Brenes-Fallas³, Jose Pablo Morales Hernández⁴, Marlon Umaña-Mondragón⁵

Fecha de recepción: 10 de mayo, 2024

Fecha de aprobación: 21 de setiembre, 2024

Solís-Ortega, R; Gómez-Ramírez, G.A; Brenes-Fallas, D;
Morales-Hernández, J.P; Umaña-Mondragón, M. Modelado
de redes de Distribución usando ETAP. *Tecnología en Mar-
cha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 48-62.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7104>

1 Escuela de Matemática. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

 rsolis@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-3065-8386>

2 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica

 ggomez@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>

3 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica

 edgar.brenes.fallas@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0004-4213-6907>

4 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica

 jpablo03041@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0002-8103-8192>

5 Escuela de Ingeniería en Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica

 maum18500@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0000-3166-7498>

Palabras clave

Gestión de carga; capacidad de alojamiento; planificación de la red de distribución; respuesta a la demanda, ETAP.

Resumen

Este artículo presenta una metodología para evaluar la modelización y simulación de redes de distribución eléctrica ante una penetración significativa de generación distribuida. Utilizando el programa Analizador de Transitorios Eléctricos (ETAP®), se modeló y simuló una red de distribución de media tensión de Costa Rica, considerando criterios para la determinación de la capacidad de alojamiento, considerando tensión, sobrecarga y corriente. Los resultados revelaron la eficacia del enfoque propuesto para identificar y evaluar los puntos críticos del sistema, sin necesidad de técnicas matemáticas adicionales. Se destacó la importancia de mantener actualizadas las bases de datos para garantizar resultados confiables y válidos. Se concluyó que la herramienta de simulación utilizada tiene la capacidad necesaria para estudiar la penetración de generación distribuida y proporcionar resultados claros para la toma de decisiones estratégicas en el sector eléctrico.

Keywords

Load management; hosting capacity; distribution grid planning; demand respond; ETAP.

Abstract

This paper introduces a methodology for evaluating the modeling and simulation of electrical distribution networks amidst significant integration of distributed generation. The Electrical Transient Analyzer Program (ETAP®) was utilized to model and simulate a medium voltage distribution network in Costa Rica, incorporating criteria for determining accommodation capacity based on voltage, overload, and current considerations. Our findings demonstrate the effectiveness of this approach in identifying and assessing critical points within the system, thereby eliminating the need for additional mathematical techniques. We underscore the importance of maintaining updated databases to ensure the reliability and validity of results. In conclusion, the simulation tool utilized exhibits the necessary capacity to analyze the integration of distributed generation, providing clear insights for strategic decision-making within the electricity sector.

Introducción

Las redes eléctricas enfrentan grandes desafíos para integrar nuevas tecnologías de generación de electricidad y cargas eléctricas [1], pero a su vez tienen grandes oportunidades en el desarrollo de herramientas para el análisis y toma de decisiones en las inversiones en la infraestructura eléctrica. Por esta razón, ante el incremento de cargas eléctricas no tradicionales como los vehículos eléctricos [2], se hace necesario evaluar tanto las redes eléctricas de transmisión como de distribución para determinar su impacto, así como para prever diversas situaciones que puedan poner en riesgo los sistemas eléctricos.

El modelado de las Redes Eléctricas requiere ciertos requerimientos y consideraciones, ya que las herramientas de simulación deben ser estables, robustas y confiables [3][4]. Debido a la naturaleza de esta tarea, es importante distinguir y clasificar el uso de distintos programas de simulación según la red que se esté estudiando. Por ejemplo, en sistemas de transmisión se ha

utilizado ETAP® para estudiar la Red Eléctrica de Centroamérica, mientras que los operadores de la red recurren a PSS/E® [1], [5]. En cuanto al análisis de las redes de distribución [3], existen varias alternativas de simulación, tales como DIgSILENT, NEPLAN, CYME, entre otras.

El modelado de las redes de distribución presenta cada día más desafíos a medida que se integran más recursos distribuidos, como los paneles solares, vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía [6], [7], [8]. Esta integración plantea dificultades en el análisis debido a la necesidad de herramientas computacionales más avanzadas y de gran capacidad de procesamiento, especialmente porque los sistemas de distribución suelen contar con una gran cantidad de nodos. Actualmente, las visualizaciones con sistemas georreferenciados se utilizan de manera satisfactoria, lo que facilita la comprensión y ubicación de los recursos distribuidos, así como la gestión de las cargas y el rendimiento de los circuitos. La Generación Distribuida (GD) se ha convertido en un elemento de importancia y análisis en la actualidad.

Debido a esta creciente complejidad en el análisis de las redes de distribución y la gran cantidad de datos involucrados, es necesario emplear métodos matemáticos para agilizar los cálculos [9]. De acuerdo con Iweh et al. [10], se han propuesto varios métodos para abordar los desafíos en la integración de nuevas tecnologías de generación de electricidad y cargas eléctricas. Estos métodos incluyen técnicas estocásticas como la simulación de Monte Carlo, la estimación de puntos, simulación Multi-Linear, la extensión de Gram-Charlier y la extensión Cornish Fisher. Además, se pueden emplear Métodos de Series de Tiempo como los Autorregresivos (AR), el Promedio Móvil Autorregresivo (ARMA) y la Media Móvil Integrado Autorregresivo (ARIMA) para generar series de datos a lo largo de largos períodos de tiempo. También señalan que se ha llevado a cabo una considerable cantidad de investigaciones sobre la importancia de la integración a la red de la generación distribuida, y proponen metodologías para su penetración. Además, destacan que los comités técnicos están evaluando la importancia de la cuantificación ante la incertidumbre, el control y la estimación de los recursos distribuidos [10].

La determinación del alojamiento y el dimensionamiento de los recursos distribuidos, en particular el almacenamiento y la generación solar, ha adquirido una mayor importancia [11], [12]. Se han llevado a cabo análisis para el control de los niveles de tensión, las pérdidas y otros aspectos [13], [14], [15]. Asimismo, se han realizado estudios en las redes eléctricas de distribución, abordando criterios de tensión y sobrecarga de los elementos [16], [17], [18], [19].

Todos estos análisis son lo que comúnmente se denominan herramientas de simulación, llamadas: "Hosting Capacity Analysis" o "Análisis de Capacidad de Alojamiento" (traducción al castellano). Las herramientas de simulación se enfocan en el análisis del cálculo de las tensiones, sobrecarga de los elementos, determinación de las pérdidas, análisis de la calidad del suministro y estimación de las corrientes de cortocircuito a fin de analizar el comportamiento de las protecciones. Esto es lo que se le llama Factores Limitantes [3]. Es importante mencionar que las herramientas de simulación pueden realizar estudios para determinar los Factores Limitantes de forma separada, sin embargo, requiere de algún análisis posterior para analizar e interpretar los resultados. Algunas otras herramientas poseen módulos donde se hace un análisis completo de la capacidad de penetración de generación distribuida aplicando métodos de estimación matemática para maximizar su penetración [3, 9]. Esto es transcendental, debido a que las redes de distribución son de una cuantía considerable y se requiere cierta capacidad computacional para ejecutar los estudios de penetración. Tanto los cálculos como los métodos son importantes a la hora de seleccionar una herramienta de simulación para los planificadores de los sistemas eléctricos.

En el caso de Costa Rica, de acuerdo con la [Ley 10086](#) [20], titulada "Promoción y Regulación de Recursos Energéticos Distribuidos a partir de Fuentes Renovables", no solo se incentiva y promociona, sino que también se vuelve necesario analizar las redes eléctricas ante una

alta penetración de recursos distribuidos renovables, como la generación fotovoltaica, los vehículos eléctricos y el almacenamiento electroquímico. Esta legislación viene acompañada de un [reglamento](#) [21] que establece pautas para el análisis de los circuitos de distribución. Dicho reglamento se centra en los productores de sistemas de pequeña escala (con una potencia instalada igual o inferior a 5000 kW), considerando su operación tanto de forma aislada como operando con y sin entrega de excedentes de energía a la red. Además, establece las condiciones para integrar sistemas de almacenamiento de energía y vehículos eléctricos en diversos modos de operación con el fin de analizar la respuesta de la demanda.

Con base en lo expuesto anteriormente, el objetivo de este trabajo es evaluar la modelización y simulación de una red de distribución ante una penetración significativa de generación distribuida, identificando de manera efectiva y eficiente los puntos críticos del sistema y evaluando exhaustivamente la red eléctrica. Además, se busca resaltar la importancia de considerar criterios de tensiones, sobrecargas y cortocircuitos en el análisis inicial, así como mantener actualizadas las bases de datos. En general, este artículo está estructurado de la siguiente manera: la sección 2 describe la metodología, la sección 3 presenta los resultados y discusiones, mientras la sección 4 expone las conclusiones.

Metodología

I. Modelado

El modelado de las redes eléctricas puede presentar características muy específicas que deben ser consideradas en cada evaluación. En particular, en el caso de las redes de distribución, es importante tener en cuenta ciertas consideraciones debido a la naturaleza de la simulación a realizar. A continuación, en la tabla 1, se enumeran las características mínimas que deben considerarse para el modelado de los elementos:

Tabla 1. Requerimientos de información de los elementos para modelado

No	Elemento	Información requerida para modelado
1	Barra infinita	Tipo de conexión (trifásica/monofásica/bifásica), conexión de fases, MVA _{falla} , relación X/R, coordenadas georreferenciadas.
2	Barra o nodo	Tipo de conexión (trifásica/monofásica/bifásica), conexión de fases, capacidades de cortocircuito simétricos, asimétricos y valor pico, coordenadas georreferenciadas.
3	Cables	Tipo de conexión (trifásica/monofásica/bifásica), conexión de fases, conductores por fase, Sistema de unidades (inglés o métrico), material del conductor, frecuencia del sistema, tensión de diseño y operación, tipo de aislamiento, calibre o área del conductor, longitud, temperaturas de operación y diseño, impedancia de secuencia.
4	Capacitor	Conexión del banco (trifásica o monofásica), conexión de fases, Tensión de diseño y operación, potencia reactiva (KVAR), # de bancos.
5	Cargas dinámicas	Tensión de operación, Potencia Activa (KW), Reactiva (KVAR) y Nominal (KVA), factor de potencia, tipo de conexión (monofásica o trifásica), conexión de fases, % carga en motores, relación X/R, Impedancias de cortocircuito.
6	Cargas estáticas	Tensión de operación, Potencia Activa (KW), Reactiva (KVAR) y Nominal (KVA), factor de potencia, tipo de conexión (monofásica o trifásica), conexión de fases.
7	Fusible	Tensión máxima, corriente nominal y de falla, Norma (IEC o ANSI).
8	Generador de inducción	Tensión de operación, HP, Tipo de conexión (monofásico o trifásico), cargabilidad y eficiencia a diferentes niveles (100,75,50,25), corriente de rotor bloqueado, letra de código NEMA, impedancias de secuencia, tipo de conexión a tierra, velocidad nominal del motor, factor de servicio, deslizamiento, # polos.

No	Elemento	Información requerida para modelado
9	Generador sincrónico	Tensión de operación, HP, Tipo de conexión (monofásico o trifásico), cargabilidad y eficiencia a diferentes niveles (100,75,50,25), corriente nominal, impedancias de secuencia, tipo de conexión a tierra, velocidad sincrónica, factor de servicio, tipo de modelo (1 ^{er} , 2 ^{do} , 3 ^{er} , 4 ^{to} , 5 ^{to} o 6 ^{to} orden), constantes del modelo dinámico, corriente de rotor bloqueado, constante de inercia, modelo de saturación de la máquina ($S_{1,0}$ y $S_{1,2}$), factor de servicio.
10	Interruptor de baja tensión	Norma (IEC o ANSI), corrientes nominales, tensión de operación y diseño, tiempos de actuación, corrientes de cortocircuito.
11	Interruptor de media tensión	Norma (IEC o ANSI), corrientes nominales, tensión de operación y diseño, tiempos de actuación, corrientes de cortocircuito simétricas y asimétricas, corriente pico.
12	Interruptor monofásico	Norma (IEC o ANSI), corrientes nominales, tensión de operación y diseño, tiempos de actuación, corrientes de cortocircuito simétricas y asimétricas, corriente pico.
13	Línea de distribución	Tipo de conexión (trifásica/monofásica/bifásica), conductores por fase, Sistema de unidades (inglés o métrico), material del conductor, frecuencia del sistema, tensión de diseño y operación, tipo de aislamiento, calibre o área del conductor, longitud, temperaturas de operación y diseño, impedancia de secuencia.
14	Recerrador	Tipo de recerrador, tipo de aislamiento, curva de operación, tensión máxima, corriente nominal, tiempo de operación, corrientes de cortocircuito máximas (pico, simétrica y asimétrica).
15	Regulador de tensión	Potencia Nominal (KVA), impedancias, relación X/R, # de posiciones del cambiador de derivaciones (primario y secundario), tensiones de operación (primario y secundario), corrientes de operación (primario y secundario), características de los transformadores de potencial y corriente internos.
16	Transformador de corriente	Corrientes de operación (primario y secundario), relación de vueltas, norma.
17	Transformador de potencial	Tensiones de operación (primario y secundario), relación de vueltas, norma.
18	Transformador dos y tres devanados	Tipo de conexión (trifásica/monofásica), # de posiciones del cambiador de derivaciones (primario y secundario), tensiones de operación (primario y secundario), corrientes de operación (primario y secundario), características de los transformadores de potencial y corriente internos, tipo (acorazado o columnas), temperaturas de diseño, Potencia Nominal (KVA), impedancias de secuencia y relación X/R en cada una de las fases, BIL, tipo de enfriamiento (ONAN, ONAF), factor K.

II. Simulación

El análisis de una red de distribución implica estudiar los perfiles de tensión, flujos de potencia, sobrecargas de los elementos (como líneas de distribución y transformadores) y determinar las corrientes de cortocircuito. En el caso de una alta penetración de generación distribuida, los niveles de tensión pueden variar, y esta generación también puede aumentar las corrientes de cortocircuito debido a su contribución a las corrientes de falla. A continuación, se detalla el procedimiento para cada uno de estos criterios (según la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, [ARESEP](#)) para determinar las capacidades de alojamiento de la generación distribuida [22], utilizando métodos de análisis basados en los Factores Limitantes:

- Analisis de los criterios de tensión en los nodos y barras del sistema:
 - Determinación de los niveles de tensión: Es necesario que las tensiones se mantengan dentro de un rango de variación de $\pm 5\%$. Este análisis debe realizarse en cada uno de los nodos, ya sea en media tensión (MT) o baja tensión (BT). Se considera que se incumple esta condición si algún elemento supera el límite establecido.

- ii. Determinación de las variaciones en la tensión: Se obtiene aplicando la ecuación (1).

$$\%DesbV = \left(\frac{V - V_{prom}}{V_{prom}} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde

$\%VT$ = porcentaje de variación de tensión

V_{cp} = tensión con Generación Distribuida

V_{sp} = tensión sin Generación Distribuida

Este criterio compara la variación de la tensión desde no tener generación distribuida hasta un valor determinado de esta. Se considera que se incumple si la variación supera un valor de $\pm 3\%$ para los circuitos de media tensión (>1000 V) y un $\pm 5\%$ para los circuitos de baja tensión (<1000 V).

- iii. Determinación de los desbalances en la tensión: se obtiene aplicando la ecuación (2).

$$\%VT = \left(\frac{V_{cp} - V_{sp}}{V_{sp}} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde

V = tensión de fase (a,b,c)

V_{prom} = tensión promedio entre las fases

Este criterio se aplica a los circuitos trifásicos de media y baja tensión. Se examina cada fase por separado con el objetivo de identificar los nodos que presenten un desbalance de tensión superior al 3% para los distintos niveles de penetración de Generación Distribuida.

- iv. Determinación de los aumentos en las acciones de control: Este criterio evalúa la acción de los reguladores de tensión en las redes eléctricas. Se centra en identificar la desviación en un nodo de control y asegurar que esta no supere el 50% de su banda de tensión definida. La aplicación de este criterio es complementaria a los anteriores, ya que refleja los cambios en los perfiles de tensión. Sin embargo, es excluyente cuando no existen reguladores en las redes eléctricas o compensación de potencia reactiva (capacitores).

- b. Análisis de sobrecarga en los conductores, transformadores y otros elementos: Este criterio identifica cuales elementos de la red eléctrica están sobrecargados en más de un 100%.

- c. Análisis de corrientes de cortocircuito

- i. Determinación del aumento de la corriente de falla: Este criterio analiza el aumento en las corrientes de cortocircuito de un punto a otro, y se espera que, bajo diferentes niveles de penetración de Generación Distribuida, no se exceda el 10% en los niveles de corriente evaluados desde un 0% de penetración hasta el valor deseado. Sin embargo, este criterio puede ser excluido si se realizan estudios y actualizaciones de ajustes, así como coordinación de las protecciones, con una frecuencia semestral.

- ii. Determinación de la reducción de alcance: En este criterio se evalúa la capacidad del sistema ante una falla para determinar la reducción de corriente de un punto a otro. Se espera que esta reducción no supere el 10% al comparar la corriente calculada de cortocircuito con y sin generación distribuida en los diferentes niveles de penetración. No obstante, este criterio puede ser excluido si se realizan estudios, actualizaciones de ajustes y coordinación de protecciones con una frecuencia semestral.
- iii. Determinación del disparo indebido: En condiciones donde se tienen más de dos circuitos alimentados desde un solo punto o generación distribuida que presente un importante aporte en las corrientes de falla, es necesario verificar la corriente de ajuste de disparo calculada en comparación con la ajustada en los interruptores, relés u otros dispositivos. Este criterio puede omitirse si los interruptores tienen activadas las protecciones de sobrecorriente con capacidad de detectar corrientes de falla bidireccionales.
- iv. Determinación de la coordinación fusible – interruptor: Se identifica la diferencia de corriente entre el valor de cortocircuito entre un fusible y el valor de cortocircuito de un interruptor visto aguas arriba. Dicha diferencia no debe superar un valor establecido. Sin embargo, este criterio puede ser excluido si se realizan estudios, actualizaciones de ajustes y coordinación de protecciones con una frecuencia semestral.

III. Procedimiento para el análisis de redes de distribución

Como se mencionó previamente, el análisis de redes eléctricas, especialmente en el caso de las redes de distribución, requiere modelado y simulación para comprender no solo su comportamiento, sino también la respuesta de la demanda ante una penetración significativa de generación distribuida. La figura 1 muestra el procedimiento para realizar el análisis, enfocándose en los Factores Limitantes del sistema.

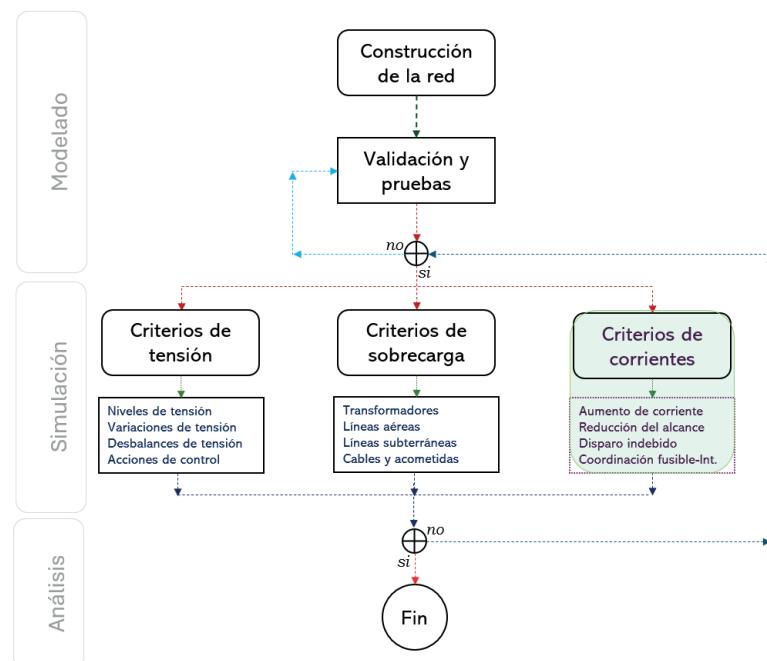


Figura 1. Esquema para el análisis de redes de distribución.

A continuación, se describe el paso a paso, propuesto en la figura 1 para establecer los criterios para el modelado, simulación y análisis de las redes de distribución:

1. El modelado del sistema de distribución requiere de la información que se menciona en la tabla 1, pues cada una de las herramientas de simulación necesita de estos datos para construir el modelo. Es importante mencionar que hoy día se dispone de modelos genéricos (en inglés common information model) para emigrar las bases de datos entre las distintas opciones de simulación. En este nivel, se deben realizar pruebas y validaciones para corregir errores e inconvenientes que puedan surgir en esta etapa. Este proceso puede requerir varias iteraciones hasta lograr el modelo deseado y satisfactorio.
2. Una vez concluida esta etapa, el nivel de la simulación aplicará los criterios establecidos en la sección 2. Para ello se deberán aplicar los criterios de tensión, sobrecarga y corriente. Es importante mencionar que en este caso deben cumplirse todos y en caso de que al menos uno de ellos no sea logrado, en este nivel de penetración de generación distribuida queda concluido la simulación. Si algún criterio no cumple, se debe realizar la simulación anterior para verificar las condiciones en la que si se alcanza el valor de penetración. Se resalta en los criterios de corriente porque, estos pueden ser omitidos si se tienen ajustados y coordinados las protecciones de los circuitos de distribución.
3. Una vez que se cumple con todos los criterios evaluados, la etapa de análisis muestra los resultados del análisis de las capacidades de alojamiento en los nodos del sistema.

IV. Caso de estudio

Para la implementación de la metodología propuesta, se modeló y simuló una red de distribución de media tensión de Costa Rica. Esta red carece de reguladores de tensión y se caracteriza por mantener una coordinación rigurosa y un ajuste estricto de los sistemas de protección. Las características específicas de dicha red se pueden observar en la tabla 2. Además, el diagrama unifilar de dicha red se puede observar en la figura 2.

Tabla 2. Características de la red del caso de estudio

Niveles de Tensión (MT/BT)	34.5/19.9/0.48/0.24 kV
Barras o Nodos	735
Transformadores Monofásicos	451
Transformadores Trifásicos	63
Cargas Monofásicas	2402
Cargas Trifásicas	160
Paneles Solares	1343
Demanda	1120.2 kW / 447.6 kVAR
Herramienta de simulación	Programa Analizador de Transitorios Eléctricos (ETAP®)

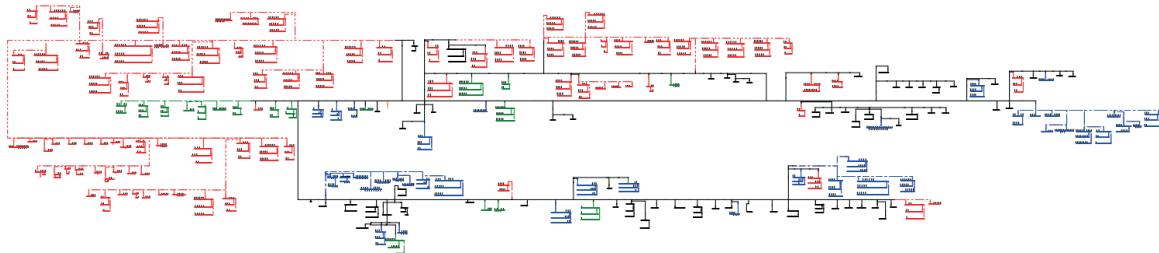


Figura 2. Diagrama eléctrico genérico de la red del caso de estudio (los colores de la red eléctrica muestran las cargas conectadas a las distintas fases del sistema (A: azul, B: verde, C: rojo) y el color negro muestra las cargas trifásicas).

En el proceso de modelado y simulación mostrado en la figura 2, se utilizó el software ETAP® (Programa Analizador de Transitorios Eléctricos) como herramienta fundamental. Se emplearon sus módulos específicos para analizar tanto el flujo de potencia balanceado como desbalanceado, así como el flujo de potencia con series de tiempo (Time Domain Load Flow). Estos módulos fueron fundamentales para calcular los flujos de potencia, perfiles de tensión y demanda dentro de la red de distribución eléctrica.

Resultados y Discusión

Con base al caso de estudio, se realizó el análisis de los criterios de tensión en los nodos y barras del sistema y el análisis de sobrecarga de los elementos. Cada circuito de distribución fue sometido a una penetración desde el 0 hasta el 100% en paneles solares de un máximo de 3000 W, donde se perfiló la generación solar de acuerdo con el comportamiento típico de la irradiancia de la zona. Se emplearon datos de simulación y de radiación horaria para calcular el patrón de generación de energía del sistema fotovoltaico. Se utilizaron los registros de irradiancia y temperatura correspondientes a un día meteorológico estándar en Costa Rica, utilizando datos climáticos provenientes de la Base de Datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB) del Laboratorio Nacional de Energía Renovable.

A continuación, se presentan los resultados de cada uno de estos análisis. Es importante destacar que los colores presentes en cada una de las figuras representan cada una de las 735 barras o nodos de la red. En el caso de los criterios de tensión, los nodos que han sido objeto de análisis, mientras que, en los criterios de sobrecarga, representan cada uno de los componentes de la red. Dada la extensión de la red de distribución, se exhiben todos los resultados, enfocándose especialmente en la observancia de los criterios establecidos, distribuyendo los resultados en percentiles de penetración de generación distribuida.

i. Análisis de los criterios de Tensión en los nodos y barras del sistema

- Determinación de los niveles de tensión:** Según las figuras 3, 4 y 5, se muestran los resultados obtenidos del análisis de tensiones en los puntos de conexión de la red eléctrica, abarcando tanto la baja como la media tensión, con condiciones de penetración que varían desde el 0% hasta el 100%, evaluadas en incrementos del 25%, 50% y 100%. Se observan sobretensiones en los nodos cuando la penetración supera el 50%; sin embargo, a medida que aumenta la penetración, se registra un incremento significativo en los niveles de tensión, que se extienden a rangos superiores al $\pm 5\%$. Es relevante destacar que las sobretensiones son más notables en la fase C, seguida de la fase A, en

contraste con la fase B, donde la magnitud es menor. Este fenómeno puede atribuirse a la tendencia de conectar un mayor número de circuitos monofásicos a las fases A y C, lo que genera una carga más elevada en dichas fases.

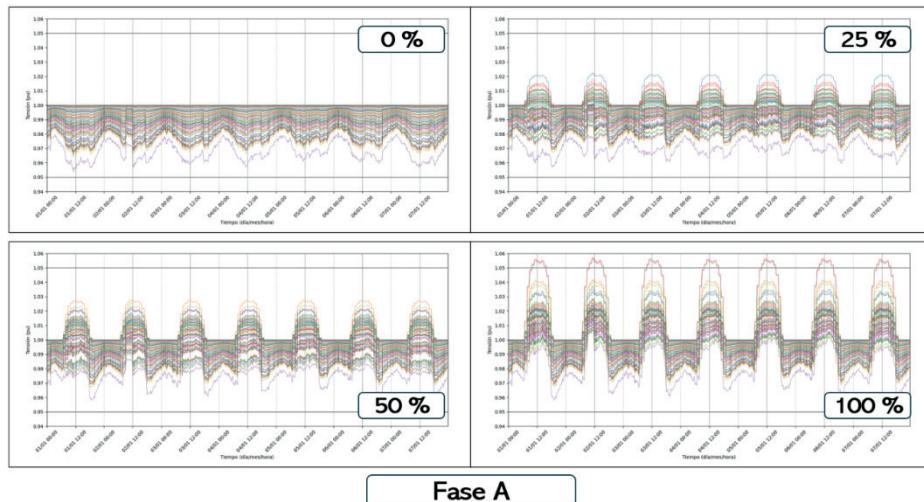


Figura 3. Resultados del Análisis de Sobretensiones para nodos de Fase A.

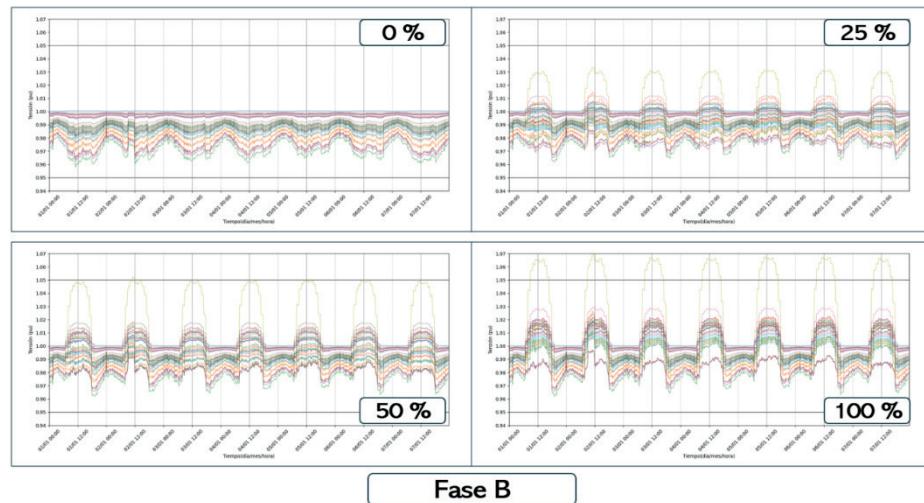


Figura 4. Resultados del Análisis de Sobretensiones para nodos de Fase B.

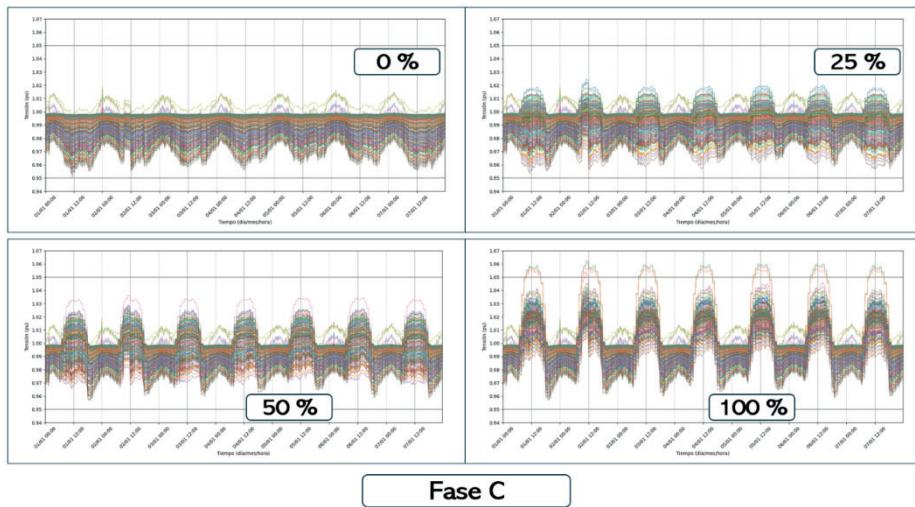


Figura 5. Resultados del Análisis de Sobretensiones para nodos de Fase C.

- b. Determinación de las variaciones en la tensión: En la figura 6, se presenta una representación gráfica que contrasta la fluctuación de la tensión en cada una de las fases del sistema bajo análisis. Se observa que los criterios establecidos tanto para los niveles de baja tensión como para los de media tensión no se cumplen cuando la penetración supera el 50%. Este fenómeno se debe al comportamiento directamente relacionado con las tensiones, el cual fue analizado en la sección anterior.

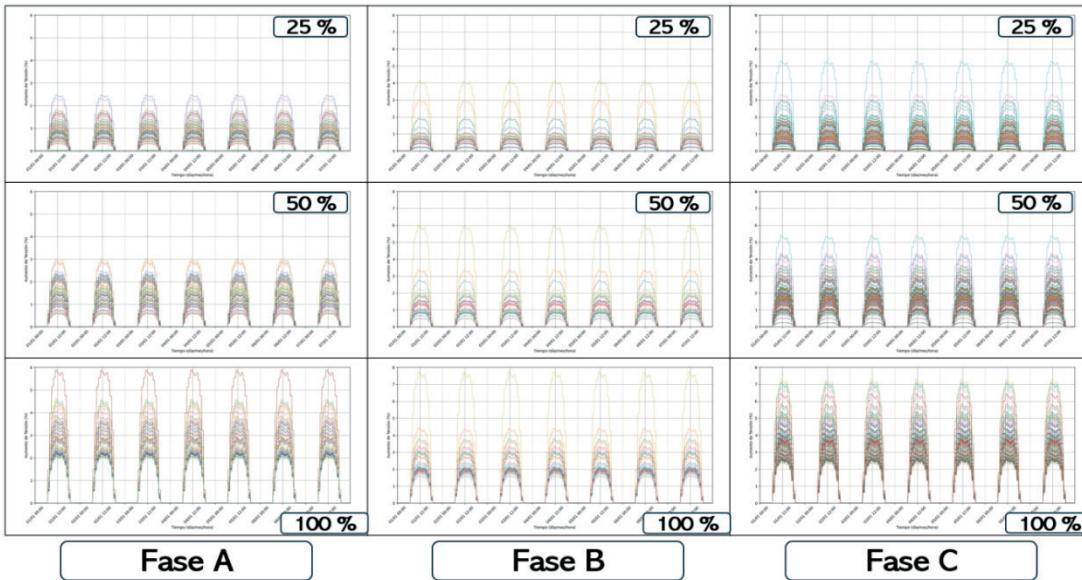


Figura 6. Resultados del Análisis de Variaciones de Tensión.

- c. Determinación de los desbalances en la tensión: En la figura 7, se puede apreciar que, para los diferentes niveles de penetración, no se observaron violaciones debido a desequilibrios de tensión, como se menciona.

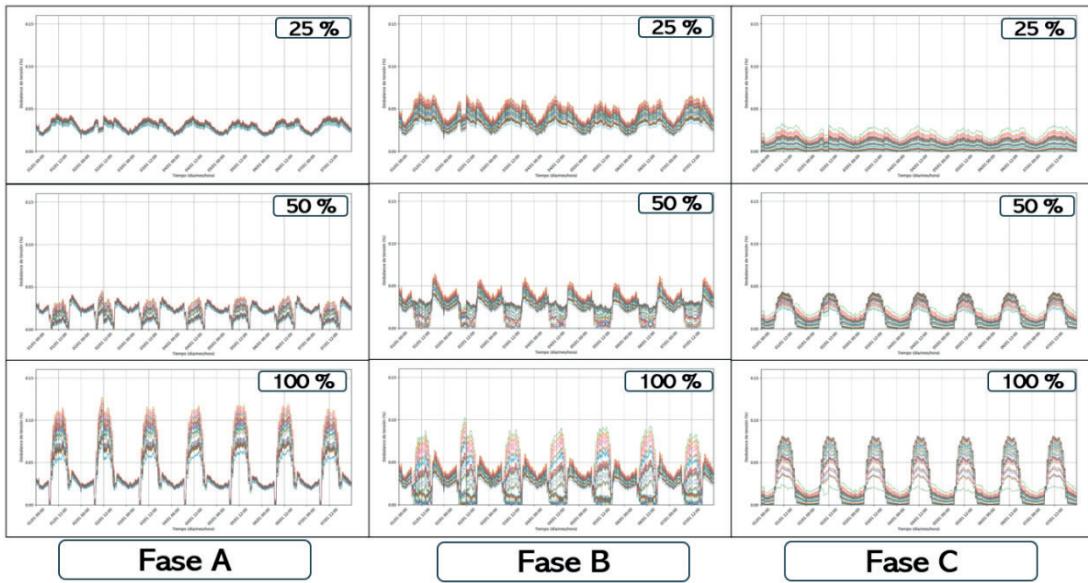


Figura 7. Resultado del Análisis de Desbalances de Tensión.

ii. Análisis de Sobrecarga de los Elementos

- a. **Determinación de sobrecarga en los conductores:** En la figura 8 se representan los niveles de sobrecarga para cada uno de los ramales de BT. Se puede apreciar que, incluso en el nivel de penetración del 0%, algunos ramales muestran restricciones, y a medida que aumenta la penetración, se evidencia la sobrecarga debido a los flujos de potencia inversos generados por la producción de electricidad. Por otro lado, la figura 9 ilustra que las líneas de distribución de MT exhiben condiciones satisfactorias, ya que en ninguno de los escenarios evaluados se registran BT.

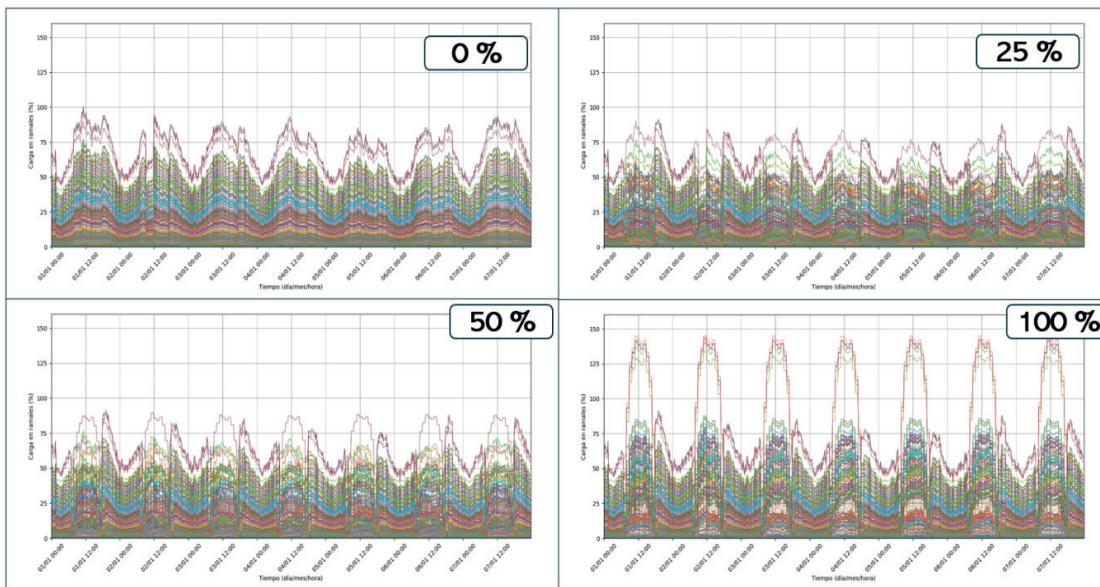


Figura 8. Resultado del Análisis de Sobrecarga en Ramales.

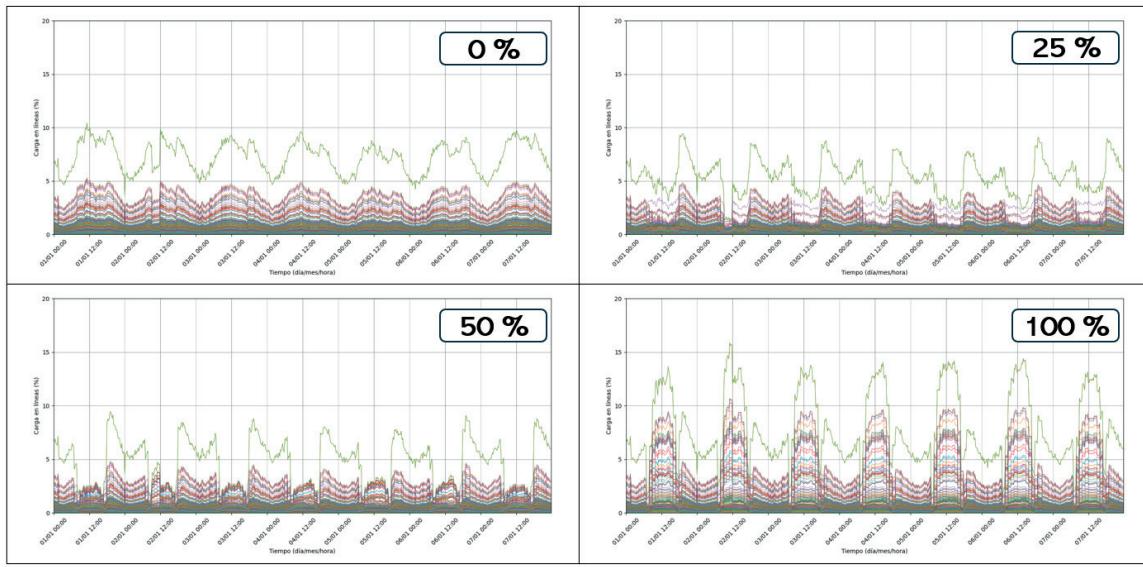


Figura 9. Resultado del Análisis de Sobrecarga en Líneas de Distribución de Media Tensión.

- b. **Determinación de sobrecarga en los transformadores:** En la figura 10, se muestra la tendencia de la sobrecarga en los transformadores. Se pueden observar cargas excesivas, particularmente en la fase C, lo cual respalda los hallazgos obtenidos en el análisis de los criterios de tensión.

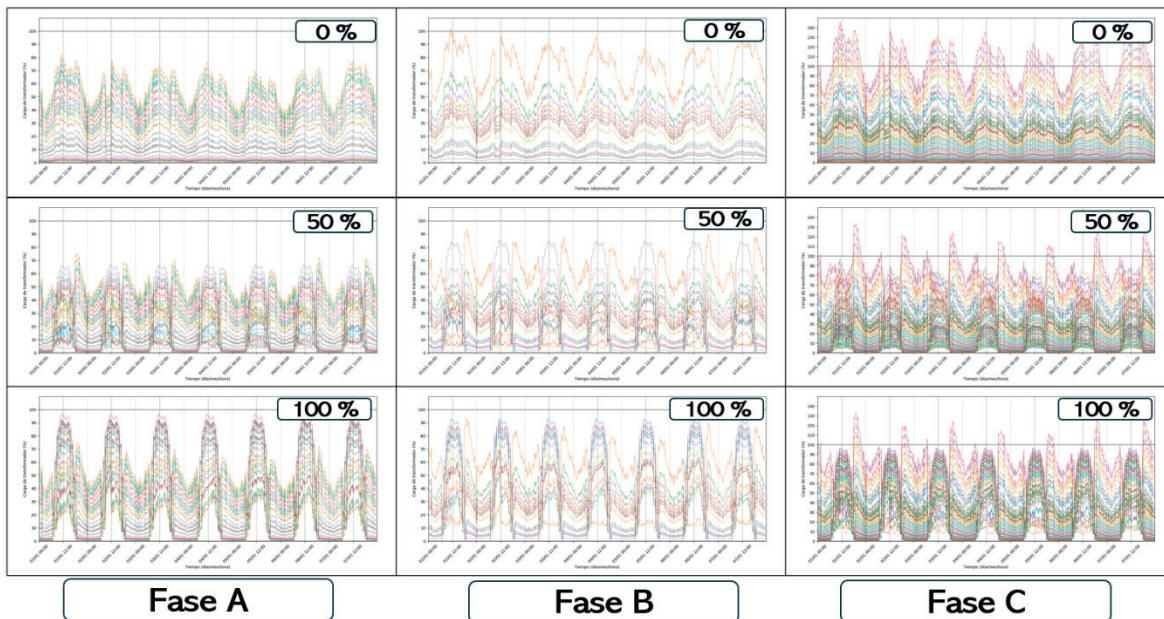


Figura 10. Resultado del Análisis de Sobrecarga en Transformadores.

Conclusiones

Se ha logrado llevar a cabo la modelización y simulación de una red de distribución frente a una penetración significativa de generación distribuida. Aunque no se hayan empleado técnicas matemáticas para optimizar la capacidad de alojamiento, se han identificado de manera efectiva y eficiente los puntos críticos del sistema y se ha evaluado exhaustivamente la red eléctrica. Es relevante destacar que, si bien los criterios de tensiones y sobrecargas son prioritarios para el análisis inicial, los criterios de cortocircuito también son relevantes siempre y cuando se mantengan actualizadas, coordinadas y ajustadas las bases de datos. Aunque muchas herramientas de simulación permiten actualmente analizar la capacidad de alojamiento de la generación distribuida utilizando sistemas georreferenciados, contar con circuitos modelados de forma diagramal hasta niveles de baja tensión puede ser una herramienta valiosa para la toma de decisiones estratégicas en este ámbito. Los programas de simulación son esenciales en el modelado y la simulación, siendo aliados fundamentales para los planificadores del sistema eléctrico.

No obstante, es crucial mantener actualizadas las bases de datos para garantizar resultados confiables y válidos. En cuanto a la herramienta de simulación empleada en este estudio, se ha demostrado que cuenta con las capacidades necesarias para llevar a cabo estudios de penetración de generación distribuida, ya sea de manera diagramal o georreferenciada, proporcionando resultados claros y adecuados para la toma de decisiones de la alta dirección.

Agradecimientos

Esta investigación forma parte del proyecto VIE 5402-1341-1901. Las personas autoras expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, la Oficina de Estudios de Posgrado y la Oficina de Becas del Instituto Tecnológico de Costa Rica por su apoyo financiero y asistencia durante esta investigación. Además, se agradece a CFS SISTEMAS S.A (representante exclusivo de ETAP para Costa Rica) y a ETAP por proporcionar la licencia de software académico utilizada en las simulaciones presentadas en este documento.

Referencias

- [1] G. A. Gómez-Ramírez, C. Meza, G. Mora-Jiménez, J. R. R. Morales, and L. García-Santander, "The Central American Power System: Achievements, Challenges, and Opportunities for a Green Transition," *Energies* (Basel), vol. 16, no. 11, Jun. 2023, doi: 10.3390/en16114328.
- [2] G. A. Gómez-Ramírez, R. Solis-Ortega, and L. A. Ross-Lépiz, "Impact of electric vehicles on power transmission grids," *Helion*, vol. 9, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.helion.2023.e22253.
- [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. 01, 2020. doi: 10.3390/en13112758.
- [4] O. J. Ayamolowo, P. Manditereza, and K. Kusakana, "Combined Generation and Transmission Expansion Planning Model for Improved Modern Power System Resilience," *Electric Power Components and Systems*, vol. 51, no. 9, pp. 898–914, 2023, doi: 10.1080/15325008.2023.2185836.
- [5] G. A. Gómez-Ramírez, G. Mora-Jiménez, and C. Meza, "Simulación del sistema de interconexión eléctrica de los países de América Central usando ETAP," *Revista Tecnología en Marcha*, Mar. 2023, doi: 10.18845/tm.v36i2.6007.
- [6] L. Mehigan, J. P. Deane, B. P. Ó. Gallachóir, and V. Bertsch, "A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems," *Energy*, vol. 163. Elsevier Ltd, pp. 822–836, Nov. 15, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.08.022.
- [7] S. M. Ismael, S. H. E. Abdel Aleem, A. Y. Abdelaziz, and A. F. Zobaa, "State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation," *Renewable Energy*, vol. 130. Elsevier Ltd, pp. 1002–1020, Jan. 01, 2019. doi: 10.1016/j.renene.2018.07.008.

- [8] S. Fatima, V. Püvi, and M. Lehtonen, "Review on the PV hosting capacity in distribution networks," *Energies*, vol. 13, no. 18. MDPI AG, Sep. 01, 2020. doi: 10.3390/en13184756.
- [9] E. Mulenga, M. H. J. Bollen, and N. Etherden, "A review of hosting capacity quantification methods for photovoltaics in low-voltage distribution grids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 115. Elsevier Ltd, Feb. 01, 2020. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105445.
- [10] C. D. Iweh, S. Gyamfi, E. Tanyi, and E. Effah-Donyina, "Distributed generation and renewable energy integration into the grid: Prerequisites, push factors, practical options, issues and merits," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14175375.
- [11] J. Qiu, Z. Xu, Y. Zheng, D. Wang, and Z. Y. Dong, "Distributed generation and energy storage system planning for a distribution system operator," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 12, pp. 1345–1353, Sep. 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5115.
- [12] F. Ding and B. Mather, "On Distributed PV Hosting Capacity Estimation, Sensitivity Study, and Improvement," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1010–1020, Jul. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2640239.
- [13] K. Janiga, "A Review Of Voltage Control Strategies For Low-Voltage Networks With High Penetration Of Distributed Generation," *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, vol. 10, no. 3, pp. 60–65, 2020, doi: 10.35784/iapgos.1928.
- [14] A. Sheikhi, A. Maani, F. Safe, and A. M. Ranjbar, "Distributed generation penetration impact on distribution networks loss," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 11, pp. 730–735, Mar. 2013, doi: 10.24084/repqj11.431.
- [15] Q. Lu, J. Chen, Y. Zhu, S. Liu, Y. Xu, and K. Wang, "Risk Assessment with High Distributed Generations Penetration Considering the Interaction of Transmission and Distribution Grids; Risk Assessment with High Distributed Generations Penetration Considering the Interaction of Transmission and Distribution Grids," 2018.
- [16] Brenes-Fallas, Edgar Darío. "Modelado y simulación de una red de distribución en media tensión de Cartago para JASEC, de acuerdo con el cumplimiento de la Ley 10086". 2023.
- [17] Morales-Hernández, José Pablo. "Estudio técnico financiero de los resultados de integrar generación distribuida a la red eléctrica de JASEC mediante modelado y simulación en ETAP". 2023.
- [18] Umaña-Mondragón, Marlon. "Evaluación del comportamiento de la red eléctrica de Coopesantos RL mediante el análisis de la penetración de recursos distribuidos de generación solar, en sistemas de potencia conforme a la Ley 10086". 2023.
- [19] De Novoa, Laura Martínez. "Optimal solar PV, battery storage, and smart-inverter allocation in zero-net-energy microgrids considering the existing power system infrastructure". University of California, Irvine, 2020.
- [20] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2021, 8 de diciembre). Ley 10086: Promoción y regulación de recursos energéticos distribuidos a partir de fuentes renovables. La Gaceta. Disponible en https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=96064
- [21] Costa Rica. Poder Ejecutivo. (2015, 14 de septiembre). Decreto Ejecutivo N° 39220: Reglamento a la Ley N° 9478, Ley de Generación Distribuida para Autoconsumo con Fuentes Renovables. La Gaceta. Disponible en https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=85514
- [22] Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos de Costa Rica (marzo 2023), ARESEP, <https://aresep.go.cr/electricidad/metodologias/>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Evaluación del comportamiento del índice de humedad y vegetación en un cultivo de café por medio de sensores remotos utilizando Vehículos Aéreos no Tripulados

Evaluation of moisture index and vegetation performance in a coffee crop by remote sensing using Unmanned Aerial Systems

Gerardo Enrique Mora-Pérez¹, Karolina Villagra-Mendoza², Sergio Arriola-Valverde³

Fecha de recepción: 29 de abril, 2024

Fecha de aprobación: 1 de agosto, 2024

Mora-Pérez, G, M, Villagra-Mendoza,K, Arriola-Valverde, S. Evaluación del comportamiento del índice de humedad y vegetación en un cultivo de café por medio de sensores remotos utilizando Vehículos Aéreos no Tripulados. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 63-76.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7133>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Estudiante: Ingeniería Agrícola
 enrique270402@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0007-6733-9315>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Prof.: Escuela Ingeniería Agrícola
 kvillagra@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0615>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Prof.: Escuela Ingeniería Agrícola
 sarriola@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1155-3076>

Palabras clave

Índice de humedad; índice de vegetación; imágenes multiespectrales; manejo agronómico; sensores remotos; café.

Resumen

La producción de café se encuentra constantemente amenazada por las condiciones de mercado y por cambios extremos del clima, afectando el rendimiento. Tecnologías con sensores remotos son una herramienta que contribuye al manejo eficiente del cultivo. Este trabajo evaluó el comportamiento de índices de humedad y vegetación en una plantación de café, bajo los sistemas agronómicos de sol y sombra, por medio de sensores remotos. Se realizaron mediciones directas de humedad, altura y diámetro de copa por medio de muestreos en campo e indirectamente con sensor LiDAR e imágenes multiespectrales utilizando vehículos aéreos no tripulados. El análisis geoespacial, con resoluciones de 5, 10 y 20 cm/px, determinó que el diámetro de los cafetos entre modelos y datos observados tuvieron un menor error al aumentar la resolución, contrario a la altura de los cafetos cuya resolución de 10 cm/píxel condujo a un menor error con respecto a los datos observados. El análisis estadístico mostró diferencias significativas de los índices multiespectrales de vegetación NDVI y de agua NDWI entre los tratamientos de sol y sombra, con respecto al consumo hídrico. El NDVI presentó una correlación fuerte para el tratamiento de sol (proporcional) y de sombra (inversa), contrario al NDWI que mostró una fuerte correlación proporcional al consumo para el tratamiento de sombra e insignificativa para el tratamiento de sol. El sensor LiDAR es una herramienta útil para obtener información de altura y diámetro en cafetos, asimismo el uso de imágenes multiespectrales son una opción para estimar el consumo hídrico del cultivo.

Keywords

Moisture index; vegetation index; multispectral imaging; agronomic management; remote sensing; coffee.

Abstract

The coffee production sector constantly faces threats from market conditions and extreme weather changes, which affect its yield. Remote sensing technologies serve as a tool to contribute to efficient crop management. This study evaluated the behavior of moisture and vegetation indices in a coffee plantation under agronomic systems of sun and shade using remote sensors. Direct measurements of moisture, height, and canopy diameter were taken through field sampling and indirectly through LiDAR sensors and multispectral images using unmanned aerial vehicles. Geospatial analysis, at resolutions of 5, 10, and 20 cm/px, determined that the diameter of coffee trees had lower error rates with increasing resolution, contrary to tree height, where a resolution of 10 cm/pixel resulted in less error compared to observed data. Statistical analysis showed significant differences in vegetation indices NDVI and water NDWI between sun and shade treatments concerning water consumption. NDVI exhibited a strong correlation with water consumption in the sun treatment (proportional), while NDWI showed a strong proportional correlation with consumption in the shade treatment and an insignificant correlation in the sun treatment. LiDAR sensors proved to be a useful tool for obtaining height and diameter information in coffee trees, while multispectral images are an option for estimating crop water consumption.

Introducción

La producción cafetalera ha venido enfrentando cada vez más, retos y desafíos, producto de condiciones climatológicas y de mercado, lo que ha hecho necesario buscar diversas soluciones innovadoras y sostenibles para asegurar su rentabilidad. Fenómenos climáticos como el Niño-Oscilación del Sur (ENOS), han tenido un gran impacto en la agricultura [1]. Los costos de producción, así como las exigencias agronómicas y ambientales de la producción han obligado a buscar tecnologías que contribuyan a un manejo más eficiente de los recursos y a mejorar la toma de decisiones en la producción de café. Tecnologías y herramientas como la inteligencia artificial y la agricultura de precisión, han tomado más valor estratégico en la producción cafetalera. El Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE) ha promovido tecnologías que permitan aumentar la sostenibilidad y la producción de un café de alta calidad, y para esto, los sensores remotos, como cámaras multiespectrales y LiDAR, se perfilan como herramientas complementarias a las labores convencionales. Por ejemplo, el ICAFE ha utilizado sensores remotos para ubicar geoespacialmente tendencias en los sistemas de producción cafetalera con el fin de identificar opciones de sistemas agroforestales en zonas donde aún se mantiene el manejo convencional, según el ICAFE [2].

Los índices multiespectrales son calculados a partir de bandas que reflejan diferentes longitudes de onda, y son formados por operaciones algebraicas entre bandas. Dentro de sus aplicaciones, los índices multiespectrales permiten monitorear la actividad de la planta a partir de fotografías digitales multiespectrales, observar radiométricamente el comportamiento de la biomasa en el espectro electromagnético, analizar el vigor de la planta con la banda infrarroja, así como generar modelos para predecir variables físicas [3]. Existe una variedad de índices multiespectrales, los más utilizados en la agricultura son: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNVI), Índice Diferencial de Agua Normalizada (NDWI), Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE), Índice de diferencia Normalizada Red Edge (NDVI red Edge), e Índice de Diferencia de Vegetación (DVI), Índice de Vigor Relativo (RVI), Índice Global de Vegetación (GVI), Índice de Estrés Hídrico por Enfermedad (DSWI), entre otros, y sirven para estimar biomasa, vigorosidad de los cultivos, estrés hídrico, cobertura y volumen de producción [4].

En este estudio se pretende analizar el comportamiento de índices de vegetación y humedad aplicados en una parcela de café la cual posee tratamientos agronómicos de sol y sombra, para ello se utilizarán mediciones de campo y datos geoespaciales adquiridos por sensores activos y pasivos a bordo de un sistema UAS, y mediante un análisis estadístico se determinará la correlación existente en entre datos de campo contra datos geoespaciales.

Materiales y métodos

El proyecto se desarrolló en un cultivo de café de la variedad arábica (*Coffea arabica L.*), en Poás de Alajuela, bajo dos sistemas de manejo agronómico en dos parcelas de aproximadamente 5 ha, para sol y sombra (Figura 1). La plantación se encuentra a una altitud de 1250 m.s.n.m., con una precipitación media anual de 2380 mm y una temperatura promedio de 20.4 °C, [5]. El orden de los suelos corresponde al Andisol[6] y la textura del área de estudio es franco (47% arenas, 15% arcillas y 38% limo) según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) [7].

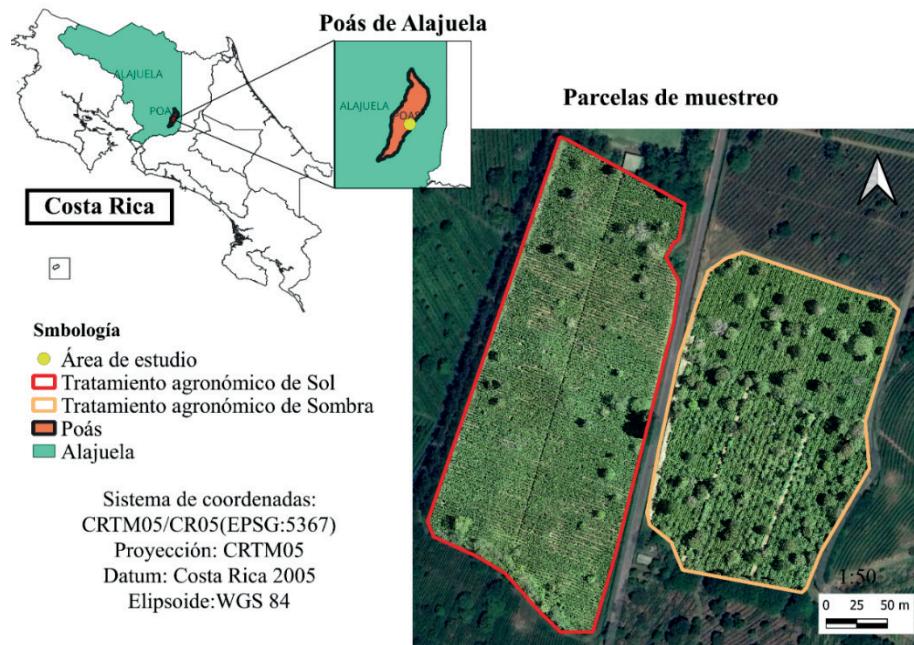


Figura 1. Ubicación del área de estudio en Poás de Alajuela e identificación de las parcelas de muestreo para sol y sombra.

Recolección de la información

Se realizaron dos campañas de muestreo para obtener datos de campo de humedad, altura, diámetro de copa de cafetos y también se realizó un muestreo con sensores remotos por medio de un vehículo aéreo no tripulado (UAV) equipado con una cámara multiespectral y LiDAR. Se utilizó un sistema UAS, marca DJI modelo MATRICE 300 RTK con un sensor multiespectral Micasense RED EDGE-P y un sensor LiDAR DJI Zenmuse L1. Los vuelos fotogramétricos se realizaron a una altura de 80 m, con un traslape del 85% y mediante un procesamiento fotogramétrico los productos multiespectrales se proyectan con una resolución espacial de 6 cm/px. Para determinar la humedad del suelo, se tomaron muestras no disturbadas en cilindros de acero inoxidable con un volumen aproximado de 100 cm³, a 5 y 20 cm de profundidad pesándose inmediatamente después de la recolección con el objetivo de obtener el peso de suelo húmedo (Psh). Por cada punto de muestreo se seleccionaron 4 plantas de café en sol y 3 en sombra y se midió respectivamente el diámetro de copa y altura. La figura 2 muestra los puntos de muestreo seleccionados en sol y sombra.

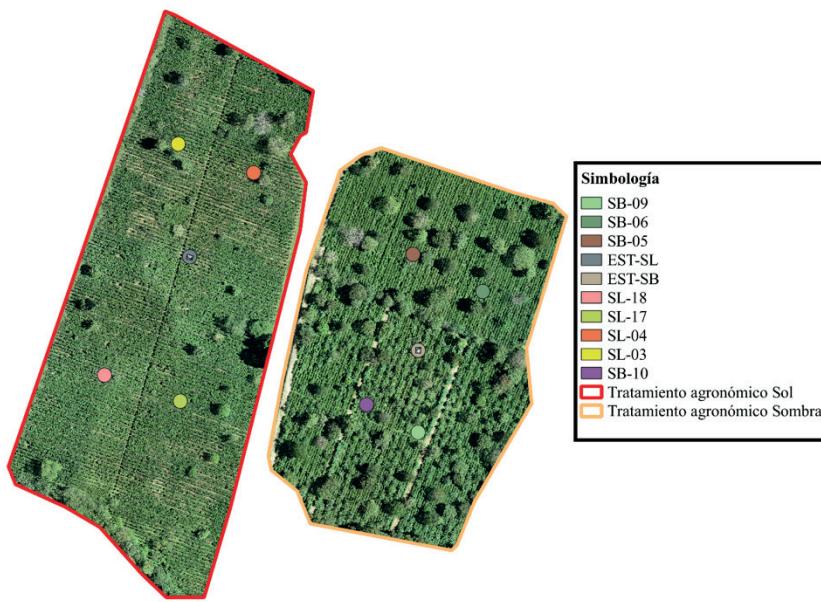


Figura 2. Puntos de muestreo del contenido de humedad y características del cultivo en cada uno de los tratamientos. Donde los tratamientos SB y SL corresponden a la zona de muestreo de sombra y sol respectivamente. EST- corresponde al punto ubicado cerca de la estación meteorológica en el tratamiento sol (SL) y de sombra (SB).

Procesamiento de muestras de suelo.

Las muestras no disturbadas, colectadas a 5 y 20 cm de profundidad, se secaron a una temperatura de 105°C para obtener el peso de suelo seco (Pss), contenido de humedad gravimétrica (HG) (Eq. 1), densidad aparente (Da) (Eq. 2), humedad volumétrica (HV) (Eq. 3), el agua consumida a 5 cm (HC5) (Eq. 4) y a 20 cm (HC20) (Eq. 5). La densidad aparente fue determinada a partir de la relación de la masa seca del suelo confinada en un volumen conocido. La humedad consumida se estimó mediante la diferencia de capacidad de campo y la humedad el suelo a la respectiva profundidad. El contenido de humedad a capacidad de campo se determinó a un potencial mátrico de 0.33 bar.

$$HG = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times 100 \quad (1)$$

$$Da = \frac{M}{V} \quad (2)$$

$$HV = HG \times Da \quad (3)$$

$$HC5 = CC - HV \quad (4)$$

$$HC20 = CC - HV \quad (5)$$

donde M es la masa suelo seco (g), V es el volumen total de la muestra (cm³), Psh es el peso de suelo húmedo (g), Pss es el peso de suelo seco (g), CC es el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo, HV es el contenido de humedad volumétrica a una profundidad de 5 y 20 cm respectivamente, HC es el porcentaje de consumo hídrico a su respectiva profundidad.

Procesamiento fotogramétrico.

Procesamiento de datos LiDAR.

A través de una nube de puntos, se generaron los modelos digitales del terreno (DTM) y de superficie (DSM), los cuales fueron utilizados para conformar un modelo de altura de dosel (CHM, por sus siglas en inglés Canopy Height Model). Los modelos se generaron a diferentes resoluciones espaciales de 5cm/px, 10 cm/px y 20 cm/px. A partir del modelo CHM, se trazaron perfiles longitudinales y transversales de los cafetos con el objetivo de determinar la altura y diámetro de los cafetos según las parcelas y puntos de muestreo seleccionados (ver figura 2).

El análisis fue estructurado en dos etapas donde la primera se estima la altura de los cafetos utilizando dos metodologías de medición 1) altura puntual donde se tomaron únicamente los picos de altura de las plantas ubicadas en un perfil longitudinal (línea roja en la figura 3A), e indicado con un punto morado en la gráfica de la figura 3A; 2) Altura Perfil, donde se calculó el promedio de todas las alturas identificadas en el perfil longitudinal indicado por las líneas de color según la resolución espacial (roja, amarilla o verde), como se observa en la gráfica de la figura 3A. El promedio se observa como la línea horizontal que cruza la gráfica. La segunda etapa determina el diámetro de copa y para ello se definieron perfiles transversales los cuales atraviesan las calles de manera perpendicular (línea roja de la imagen de la figura 3B). El diámetro del cafeto se midió de acuerdo con el ancho indicado con la línea azul, como se muestra en la gráfica de la figura 3B.

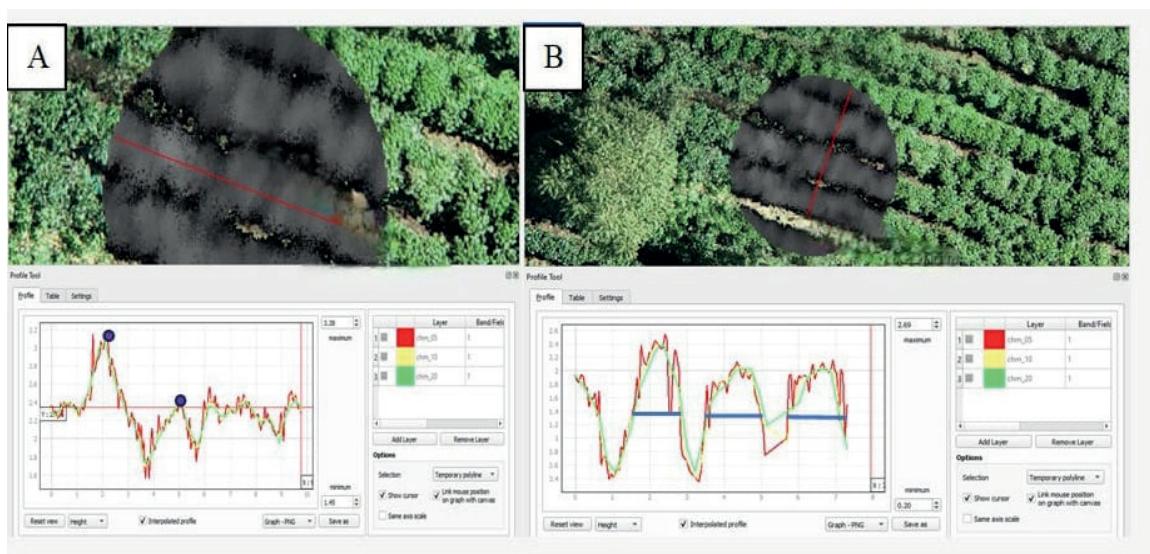


Figura 3. Perfil longitudinal y transversal para medir a) altura y b) diámetro de copa. Donde cada línea en el gráfico representa una resolución espacial, roja 5 cm/px, amarilla 10 cm/px, verde 20 cm/px.

Procesamiento multiespectrales.

Las imágenes capturadas en las bandas RED, GREEN, BLUE, NIR, RED EDGE y Pancromática (figura 4C). se cargaron en el software Pix4Dmapper con licencia educativa y fueron calibradas radiométricamente con los respectivos valores de reflectancia según el fabricante. Obteniendo un ortomosaico de todo el terreno en cada una de las bandas.

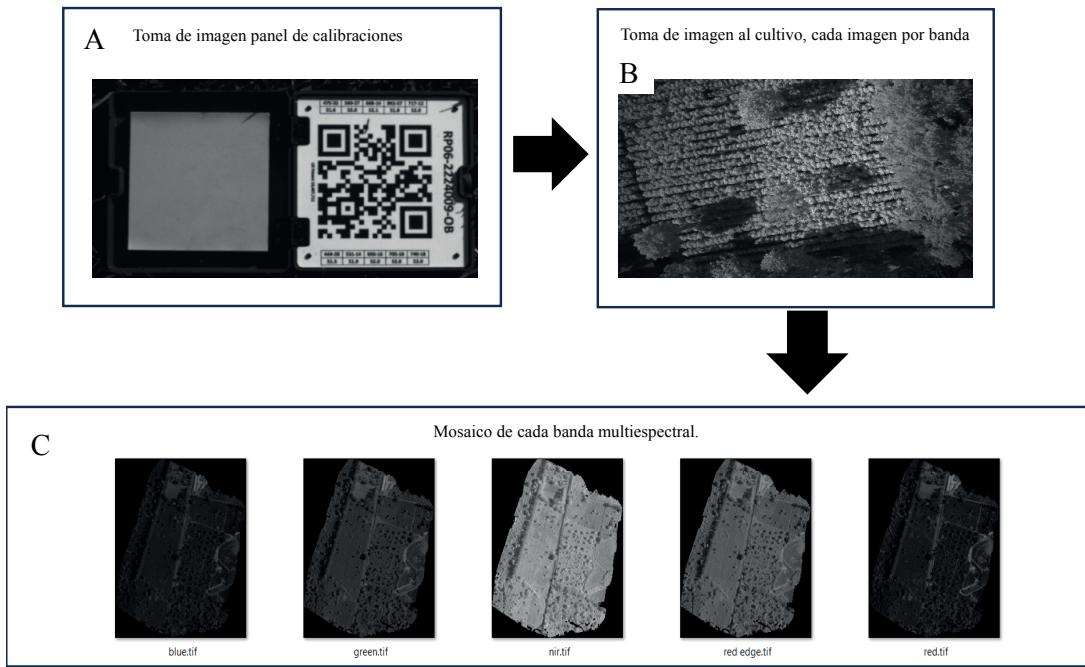


Figura 4. Procesamiento de imágenes multiespectrales, donde se observa a) el proceso de calibración radiométrica de las imágenes, b) imagen filtrada por banda, c) mosaico de la imagen con diferentes bandas generadas.

A partir de los ortomosaicos de bandas multiespectrales se calcularon los índices: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Eq. 6), Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) (Eq. 7), Índice de Diferencia Normalizada de Borde Rojo (NDRE) (Eq. 8), Índice de Diferencia Normalizada Red Edge (NDVI red Edge) (Eq 9), e Índice de Diferencia de Vegetación (DVI) (Eq. 10). Los índices normalizados oscilan entre +1 y -1, siendo los valores próximos a +1 aquellos con mayor humedad o vigorosidad y los valores próximos a -1 los que poseen menor humedad o vigorosidad, [8].

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (6)$$

$$NDWI = \frac{(GREEN-NIR)}{(GREEN+NIR)} \quad (7)$$

$$NDRE = \frac{NIR-REDEdge}{NIR+REDEdge} \quad (8)$$

$$NDVI\ rededge = \frac{rededge-RED}{rededge+RED} \quad (9)$$

$$DVI = NIR - RED \quad (10)$$

Para analizar únicamente los cafetos se utilizó el índice DVI (figura 5A) esto con el fin de filtrar el suelo del cultivo, permitiendo únicamente analizar la vegetación. Se asignó un NO DATA (N/DA) a aquellos valores del DVI menor a 0.2 con ayuda de la calculadora ráster y de la ecuación 11:

$$((x > 0.20) * x) / ((x > 0.20) * 1 + (x \leq 0.20) * 0) \quad (11)$$

donde x son los valores iguales o inferiores que se desean volver N/DA.

En los diferentes puntos de muestreo se creó una capa vectorial de un círculo con un radio de 5 m abarcando una zona de estudio, esta capa vectorial también ayudó a disminuir el desfase entre un vuelo y otro debido a la ausencia de puntos de control. La capa vectorial sirvió como máscara para recortar la ortofoto y reducir el tiempo de procesamiento. El DVI se recortó con el círculo de las zonas de muestreo (figura 5B) y se convirtió de capa ráster a capa vectorial para posteriormente servir como una nueva capa máscara (figura 5C) y así extraer los datos de los índices únicamente sobre la vegetación. Esto se realizó para cada uno de los índices generados (NDVI, NDVI RED EDGE, NDRE y NDWI). A partir la capa máscara generada del índice DVI, se extrajo por cada zona de muestreo en un archivo vectorial permitiendo realizar una extracción por corte máscara en lotes generando 10 ráster de las zonas de muestreo con los datos del índice establecido como capa de entrada. Al calcular los cuatro índices, se generaron 40 ráster por vuelo. De cada ráster se extrajo el promedio, siendo el valor promedio del índice en esa zona de muestreo (figura 5D).

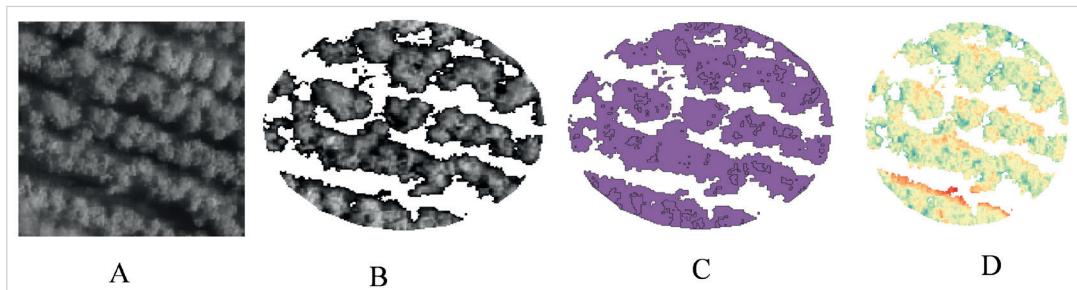


Figura 5. Recorte de solo cafetos en los índices usando el índice DVI donde a) es la zona de muestreo, b) es el buffer de las zonas de muestreo, c) es la capa máscara, d) valor del índice promedio.

Análisis estadístico de los índices de vegetación y humedad

Se realizó una matriz de correlación con los índices generados (NDRE NDVI RED EDGE, NDWI, NDVI) y las variables calculadas de forma directa (HV5, HC5, HV20, HC20) con el fin de analizar el comportamiento entre los índices y los datos de humedad recolectados para cada uno de los tratamientos agronómicos. Sumado se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y de significancia por medio de Tukey ($p < 0.05$) con el fin de analizar el comportamiento de las variables en los tratamientos sol y sombra. Se calcularon los errores estadísticos error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{ajustado}$) y la desviación estándar (σ) entre los datos obtenidos directa e indirectamente (ver ecuaciones 12, 13, 14 y 15). El criterio de análisis del $R^2_{ajustado}$ y R^2 , se basó en que los valores más altos indican una menor varianza del error, siendo 1 una predicción perfecta de la variable, un R^2 , $R^2_{ajustado} > 0.5$ se considera aceptable, un mientras un RMSE menor a la mitad de σ de los datos observados se considera indicativo de una buena precisión del modelo [9].

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum(Y_j - \hat{Y}_j)}{\sum(Y_j - \bar{Y})} \right)^2 \quad (12)$$

$$R^2_{ajustado} = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_j)^2} \quad (14)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (15)$$

Donde Y_j es el dato medido en campo, \hat{Y}_j es el dato del sensor remoto LiDAR, n el número de observaciones, p es el número de variables independientes, \bar{Y} es la media de la variable Y , Y_i es el i ésimo dato, Y_{media} es el promedio aritmético.

Resultados y Discusión

La tabla 1 muestra los resultados de los errores RMSE, R^2 y $R^2_{ajustado}$, para las resoluciones de 5, 10 y 20 cm/px con respecto a los datos de altura de cafetos medidos directamente en campo. La metodología de altura puntual obtuvo mejores resultados con respecto a la metodología de altura perfil, con un RMSE máximo de 0.0787 m mientras que el RMSE máximo de altura puntual fue de 0.0297 m. Al comparar los resultados de altura de las tres resoluciones se observó un comportamiento proporcional entre la resolución espacial y el RMSE, al aumentar la resolución espacial el RMSE aumentó también, mientras que el $R^2_{ajustado}$ siguió un patrón aleatorio en el orden de 10 cm/px, 20 cm/px y 5 cm/px. Esto se puede deber al tamaño del píxel y características de la variable a medir. Por ejemplo, la altura de un cafeto la puede determinar una rama que vista desde arriba por el dron su área de visualización puede ser pequeña, así el tamaño del píxel juega un papel muy importante, ya que, en una resolución muy pequeña, como lo es 5 cm/px, los datos atípicos son más evidentes (figura 3 línea roja) al compararla con la resolución de 20 cm/px donde el píxel es más grande, es más factible suavizar los datos atípicos (figura 3 línea verde). Bajo este análisis la mejor resolución espacial para estimar altura de cafetos es de 10 cm/px. Sin embargo, dado que la desviación estándar de los datos de altura medidos de manera directa en campo dio como resultado 0.22, y al comprarlo con los valores RMSE que fueron menores a la mitad de la desviación estándar, se consideró las 3 resoluciones presentaron buen rendimiento.

Tabla 1. Análisis de confiabilidad basado en errores estadísticos de dos metodologías para el cálculo de alturas en cafetos, obtenidas en los diferentes modelos de vegetación para 10 puntos de muestreo.

Análisis de error estadístico	Altura en modelos de altura de vegetación					
	Resolución cm/píxel					
	5		10		20	
Altura puntual	Altura perfil	Altura puntual	Altura perfil	Altura puntual	Altura perfil	Altura perfil
R^2	0.8498	0.8382	0.8878	0.8383	0.8690	0.8554
R^2 ajustado	0.8310	0.8180	0.8738	0.8180	0.8526	0.8373
RMSE (m)	0.0146	0.0787	0.0250	0.0798	0.0297	0.0727

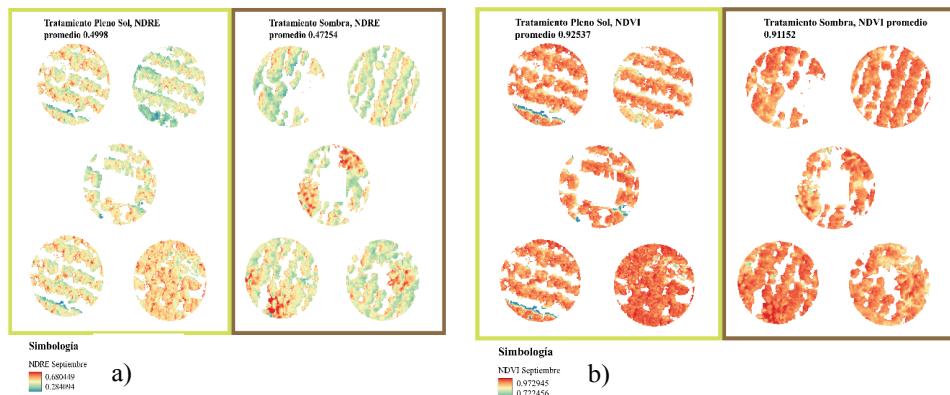
Para el análisis de los diámetros de copa en cafetos los datos mostrados en la tabla 2, en general, se ajustaron con mayor precisión. Con la resolución espacial de 5 cm/px se obtuvieron mejores resultados, siendo la más precisa, con un error RMSE menor. Siendo que a mayor resolución espacial el error respecto a la medición directa disminuyó. La desviación estándar de los datos de diámetro medidos fue de 0.24 m, siendo los RMSE calculados menores a la mitad de la desviación estándar, bajo este criterio, las 3 resoluciones presentaron buen rendimiento, [9].

Investigaciones han determinado un R^2 promedio de 0.67 en el uso del sensor LiDAR para medir altura y un R^2 promedio de 0.53 para el diámetro de copa en árboles para una resolución de 50 cm/px [10]. Según la investigación de Maesano et. al [11] reportó con una resolución de 20 cm/px un R^2 de 0.73, en las mediciones de altura de caña (*arundo donax*). Los resultados obtenidos por Islas et. al [12] fueron los siguientes, un R^2 ajustado de altura total y diámetro con LiDAR respecto con los datos medidos en campo de 0.916 y 0.841, respectivamente; y concluyó que una resolución de 5 m/px era más adecuada para medir altura y diámetro para estimar biomasa aérea de árboles. Al comparar las resoluciones de 20 cm/px — entre los resultados de Maesano et. al [11] con los obtenidos en este estudio en el cultivo de café — se observó un aumento considerable en el R^2 en nuestro estudio. A pesar de utilizar resoluciones iguales, el motivo de la mejora se puede atribuir al tipo de vegetación medida, sensores usados y metodologías de medición empleados.

Tabla 2. Análisis de confiabilidad basado en errores estadísticos de diámetros de cafetos obtenidos en los diferentes modelos de vegetación para 10 puntos de muestreo.

Análisis de error estadístico	Diámetro en modelos de altura de vegetación		
	Resolución cm/píxel		
	5	10	20
R^2	0.9610	0.9166	0.8763
R^2 ajustado	0.9561	0.9062	0.8608
RMSE (m)	0.0022	0.0059	0.0073

La figura 6 muestra los índices vegetativos NDRE y NDVI. Donde el NDRE muestra una vigorosidad media mientras que en el NDVI la vigorosidad es alta. Otros trabajos como el de [13] han calculado un valor promedio de NDVI de 0.93 para café pleno sol. El estudio desarrollado por Revelo et al [14] reportó una mejor respuesta del NDRE en la variabilidad del vigor, ya que este índice tiene su uso en cultivos en etapas avanzadas de desarrollo. Al analizar los valores obtenidos respecto a otros estudios se encontró diferencias en el índice NDRE y similitudes entre los resultados del NDVI, en el tratamiento pleno sol. Al analizar los resultados del NDRE en los diferentes proyectos se validó el uso de este índice para cultivos en etapas avanzadas.



La figura 7 muestra la matriz de correlación de los índices de vegetación y las variables de humedad del suelo, para cada tratamiento agronómico de sol y sombra, para dos observaciones. En el tratamiento de sol, la mayor correlación respecto a las variables de humedad y los diferentes índices fue entre el consumo hídrico a una profundidad de 5 cm (HC5) con el índice NDVI con una correlación positiva de 0.56, indicando que las plantas con un índice mayor fueron las que consumieron mayor cantidad de agua. Los otros índices de vegetación mostraron una menor correlación positiva, así como el NDWI que mostró una débil correlación negativa de -0.14 con posibilidades muy bajas de poder generar un modelo para estimar el consumo hídrico a partir del NDWI.

En el caso del tratamiento de sombra, se presentó una correlación moderada e inversamente proporcional entre los índices vegetativos y HC5 destacando los índices NDRE y NDVI, con una correlación negativa de -0.90 y de -0.57 respectivamente, indicando que en el tratamiento de sombra a mayor valor de índice vegetativo el consumo hídrico de la zona es menor, mientras que el índice NDWI posee una correlación de 0.79 con él HC5. Esto significa que a menor valor de NDWI, mayor consumo hídrico a 5 cm de profundidad.

Al comparar los resultados del tratamiento sol y sombra se observó que son inversos en los índices vegetativos. En el tratamiento de sol las correlaciones son positivas, en un rango entre 0.39 y 0.59 lo cual significa que a mayor vigor de la planta esta tiende a consumir mayor cantidad de agua. Esto se puede deber a que dentro del tratamiento sol el consumo de agua se puede ver afectado por la evaporación producida por los rayos solares y la transpiración de la planta, siendo menos los factores que participan en el consumo hídrico a diferencia del tratamiento sombra que posee otros cultivos que interfieren en los índices y generan condiciones diferentes al tratamiento sol. En condiciones naturales las demandas de agua debido a la evaporación se ven afectadas por las fluctuaciones climáticas y el tipo de textura, Necochea [15], el uso de cobertura puede variar significativamente la evaporación de agua en el suelo en comparación de un cultivo sin cobertura, Gomes et al [16]. Siendo la cobertura vegetal del tratamiento de sombra un factor importante.

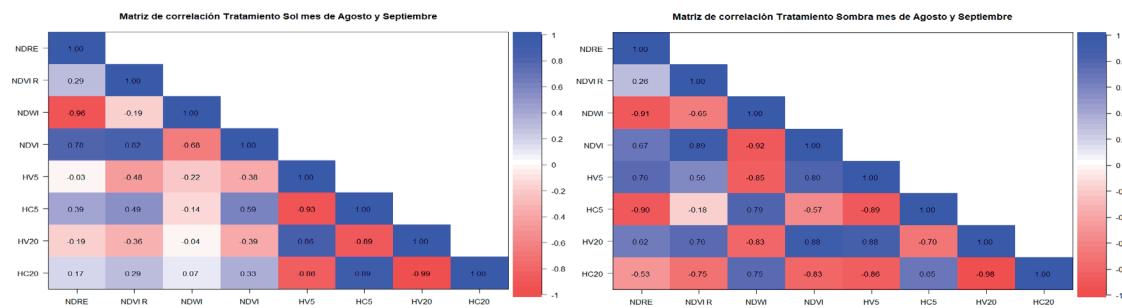


Figura 7. Matriz de correlación tratamiento de Sol y Sombra en los meses de agosto y septiembre del 2023. NDV R: NDVI REDEDGE, HV5: porcentaje de humedad volumétrica a una profundidad de 5 cm, HC5: consumo hídrico a 5cm de profundidad, HV20: porcentaje de humedad volumétrica a una profundidad de 20 cm, HC20: consumo hídrico a 20 cm de profundidad.

Le figura 8 muestra la tendencia del comportamiento de los índices NDVI y NDWI para los tratamientos de sol y sombra. Para ambos índices se observaron tendencias de comportamiento opuestas de acuerdo con la presencia o no de sombra. Bonnaire et al [17] no reportaron diferencias significativas en el espacio temporal entre 3 parcelas de café a pleno sol con diferente déficit de nitrógeno en el índice multiespectral del NDVI. El estudio realizado por Revelo et al [14], recomendó el índice NDRE para explicar variaciones de vigor en café e indicó la aptitud del índice NDVI para ser utilizado en la estimación del tipo de cobertura y para evaluar la variación temporal del tejido vegetal. Los estudios realizados por [14] y [17] concilian en la poca variabilidad del NDVI en un mismo uso agroforestal químico y recomendaron la utilización de este índice para determinar el tipo de cobertura como la tiene el uso agroforestal sombra.

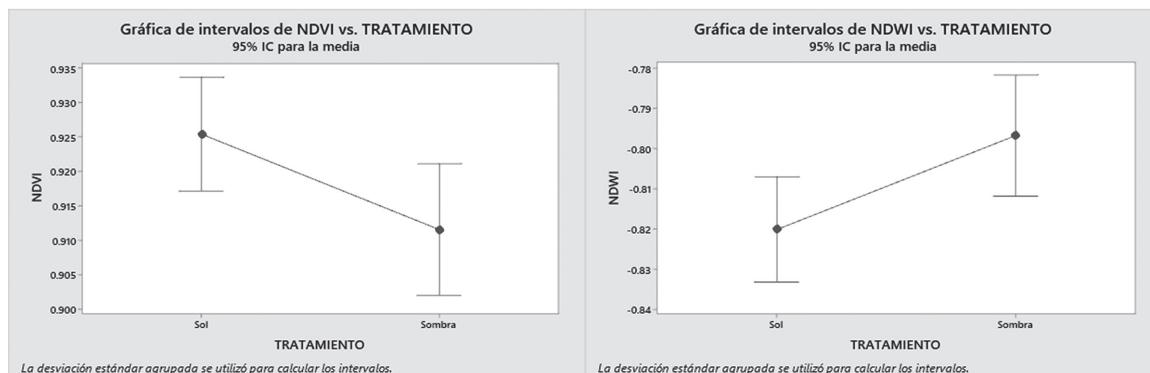


Figura 8. Análisis de Varianza de los índices NDVI y NDWI en los tratamientos de sol y sombra.

Conclusiones

Los datos obtenidos por medio de sensores LiDAR permiten estimar altura y diámetro de copa de los cafetos, siendo la resolución de 10 cm/píxel la mejor según el análisis de $R_{ajustado}$ y el RMSE, mientras que la mejor resolución espacial para estimar diámetro de copa en cafetos fue de 5 cm/px, sin embargo las tres resoluciones espaciales tanto para altura y diámetro de copa en cafeto obtuvieron resultados eficientes según el criterio del RMSE y los coeficientes de determinación.

Los índices NDVI y NDWI se comportaron inversamente en los tratamientos agronómicos de sol y sombra. El NDVI en el tratamiento de sombra explicó de forma inversa el consumo hídrico, es decir, en la zona de sombra con mayor valor del índice NDVI se dio un menor consumo hídrico, mientras que en el tratamiento de sol el NDWI explicó mejor la vigorosidad del cultivo y se correlacionó mejor con el aumento en el consumo hídrico. De acuerdo con los resultados, el índice NDVI se puede considerar como un indicador para estimar el consumo hídrico tanto del cultivo de café como la vegetación utilizada para el tratamiento de sombra, mientras que el tipo de uso agroforestal puede influir en el comportamiento del índice NDWI y el consumo hídrico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el financiamiento para realizar este estudio y al proyecto Dinámica de la Captura de Carbono en Agroecosistemas cafetales innovadores (DiC²AFE) financiado con el Fondo Especial para la Educación Superior (FEES) por permitir realizar esta investigación.

Referencias

- [1] C. Brenes, “El fenómeno de El Niño y la agricultura latinoamericana”, San José, Costa Rica, 2014. Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/2992>
- [2] Instituto del Café de Costa Rica (Icafe), “Actualización Área Cafetalera 2017 - 2018”, Heredia, jun. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/maps/gxPZgBn8ZXB2>.
- [3] E. F. Avila- Vélez y B. Royero Benavides, “Application of vegetable indices in coffee (*Coffea arabica* L.)”, *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, vol. 24, núm. 2, dic. 2021, doi: 10.31910/rudca.v24.n2.2021.1584.
- [4] Piedad A, D. Hernández, H. Lárraga, y E. Zacarías, “Teledetección en la Agricultura de Precisión: Estado del Arte en los Índices de Vegetación”, *TECTZAPIC*, vol. 6, pp. 46–58, 2020, Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8504957>
- [5] C. Chinchilla-Soto, A. M. Durán-Quesada, M. Monge-Muñoz, y M. V. Gutiérrez-Soto, “Quantifying the annual cycle of water use efficiency, energy and CO₂ fluxes using micrometeorological and physiological techniques for a coffee field in costa rica”, *Forests*, vol. 12, núm. 7, jul. 2021, doi: 10.3390/f12070889.
- [6] E. Ortis, “Atlas de Costa Rica 2014”, 2014. Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/2238/6749>
- [7] FAO and IUSS, “Base referencial mundial del recurso suelo 2014”, Roma, Italia, 2016. Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org>
- [8] M. Zakir, “GIS and RS Based Spatio-Temporal Analysis of Soil Moisture/Water Content Variation in Southern Irrigated Part of Sindh, Pakistan”, *Journal of Remote Sensing & GIS*, vol. 07, núm. 04, sep. 2018, doi: 10.4172/2469-4134.1000250.
- [9] G. Golmohammadi, S. Prasher, A. Madani, y R. Rudra, “Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT”, *Hydrology*, vol. 1, núm. 1, pp. 20–39, 2014, doi: 10.3390/hydrology1010020.
- [10] M. Coromines Munt, E. Blanco Casellas, y A. Ruiz García, “Aplicación de la Tecnología LIDAR al Estudio de la Cobertura Vegetal”, *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, vol. 19, pp. 71–77, 2005, Consultado: el 20 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2981951>
- [11] M. Maesano *et al.*, “UAV-based LiDAR for high-throughput determination of plant height and above-ground biomass of the bioenergy grass arundo donax”, *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, núm. 20, pp. 1–20, oct. 2020, doi: 10.3390/rs12203464.
- [12] F. Islas Gutiérrez *et al.*, “Ecuación Alométrica para Estimar Biomasa Aérea de Árboles de *Pinus harwegii* a partir de Datos LIDAR”, *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 47, núm. 1, p. 70, mar. 2024, doi: 10.35196/rfm.2024.1.70.

- [13] E. F. Avila-Vélez y B. Royero-Benavides, "Application of vegetable indices in coffee (*Coffea arabica* L.)", *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgación Científica*, vol. 24, núm. 2, dic. 2021, doi: 10.31910/rudca.v24. n2.2021.1584.
- [14] D. Revelo, J. Mejía, B. Montoya, y J. Hoyos, "Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*)", Colombia, ago. 2020. doi: <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.628>.
- [15] J. Necochea, "Efecto del Biochar en la Curva de Retención de Agua de Materiales de Revale de Cobre", Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2021. doi: 10.7764/tesisUC/ING/62196.
- [16] J. Gomes, J. Pacheco, R. Carlesso, C. Trois, y A. Knies, "Perdidas de agua por evaporación en maíz con siembra convencional y directa para diferentes niveles de cobertura muerta. I. resultados experimentales", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 20, pp. 60–64, 2011, [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93222228012>
- [17] L. Bonnaire, B. Bonilla, y F. Obando, "Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castillo", *Ciencia Tecnología Agropecuaria*, vol. 22, núm. 1, abr. 2021, doi: 10.21930/RCTA.VOL22_NUM1_ART:1578.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Resistencia a la compresión del concreto: Una revisión - Caso Nicaragua

Compressive strength of concrete: A review -Nicaragua case

Eddisson Francisco Hernández¹, Jennifer Manzanarez-Alvarado²

Fecha de recepción: 7 de mayo, 2024
Fecha de aprobación: 29 de julio, 2024

Hernández, E.F; Manzanarez-Alvarado, J. Resistencia a la compresión del concreto: Una revisión - Caso Nicaragua. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 77-88.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7149>

1 Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Americana. Nicaragua
 eddisson.hernandez@uam.edu.ni
 <https://orcid.org/0000-0002-9602-5805>

2 Oficina de Innovación y Emprendimiento. Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua.
 Jennifer.manzanarez@oie.uni.edu.ni

Palabras clave

Cemento; agregados; calidad; diseño de mezcla; resistencia a la compresión.

Resumen

El concreto es un material compuesto constituido de pasta de cemento y agregados, el cual, según los materiales y proporciones empleados, presentan diferentes propiedades tanto en estado fresco como endurecido. Según el estado del arte, la resistencia a la compresión es la propiedad especificada para determinar su calidad a los 28 días, la cual, está en función de algunos factores como el proceso de hidratación del cemento, tipos y tamaños de agregados, proporción de materiales y condiciones de curado. En este trabajo, a través de una revisión documental, se presenta el análisis y valoración de los factores que afectan las propiedades del concreto elaborado en Nicaragua, utilizando datos sobre las propiedades físicas de los materiales, diseño de mezclas y resistencia a la compresión, obtenidos en laboratorio y campo. Destacándose como los más relevantes: el tipo de cemento, tipo y tamaño máximo de agregado, relación cemento/agregado y agregado grueso/agregado fino.

Keywords

Cement; aggregates; quality; mix design; compressive strength.

Abstract

Concrete is a composite material conformed of cement paste and aggregates, which, depending on the materials and proportions used, has different properties both in the fresh and hardened state. According to the state of the art, compressive strength is the property specified to determine its quality at 28 days, which is in function of some factors such as the cement hydration process, types and sized of aggregates, proportion of materials and curing conditions. In this work, through a documentary review, the analysis and assessment of the factors that affect the properties of concrete elaborate in Nicaragua are presented, using data on the physical properties of the materials, mix design and compressive strength, obtained in laboratory and field. Highlighting as the most relevant: the type of cement, type and maximum size of aggregate, cement/aggregate and coarse aggregate/fine aggregate, ratios.

Introducción

El concreto es un material que, por su facilidad de conformación en elementos estructurales, en variedad y formas, es ampliamente usado en la construcción. Su consistencia plástica, le permite fluir en cualquier encofrado prefabricado [1]. Es un material compuesto económico y fácilmente de elaborar, constituido de agregados, agua y material cementante. A diferencia del acero, este no se corroe, haciendo que las estructuras con este material requieran poco mantenimiento, sean resistentes al fuego y a ciclos de carga [1, 2].

Según la literatura, el deterioro prematuro presentado en construcciones de concreto reforzado, está relacionado de manera general con el diseño estructural, la calidad de los materiales y las prácticas constructivas [3]. Este deterioro, reduce su durabilidad al estar expuestas a condiciones ambientales agresivas que afectan su desempeño [4]. Para incrementar la vida de servicio de las estructuras de concreto reforzado, se reduce la relación agua/cemento (a/c), emplean adiciones minerales, aditivos químicos e inhibidores de corrosión [5].

En estado endurecido, las principales propiedades del concreto son la resistencia mecánica, densidad, porosidad, absorción capilar, resistividad, permeabilidad, etc. De estas, la resistencia a la compresión axial es la que está relacionada con su calidad, y la resistividad con la durabilidad [2]. De manera similar, la Norma Mínima de Diseño y Construcción de concreto Estructural (CR-001) de Nicaragua [6], considera la resistencia a la compresión como el parámetro empleado para evaluar su calidad a los 28 días de edad.

En Nicaragua, debido a la alta sismicidad de su territorio y de la región centroamericana, es necesario construir viviendas sismo-resistentes [7]. En la actualidad existen diversas maneras de construir con seguridad estructural y acabados de excelente calidad. Sin embargo, atender los requerimientos constructivos y estructurales adecuados resulta costoso, y en algunos casos, no se cuenta con la mano de obra calificada [4].

Entre los sistemas constructivos utilizados en el país, la mampostería confinada es el más popular. Está constituida principalmente de una estructura de concreto armado resistente, que brinda seguridad y confort a sus habitantes [7, 8]. De acuerdo con la Nueva Cartilla de la Construcción de Nicaragua [9], la mampostería está compuesta de concreto, mortero, hierro y el mismo mampuesto (ladrillos, bloques, entre otros). En relación con el concreto, se requiere que este material cumpla con una resistencia a la compresión superior a 210 kg/cm², en vigas y columnas. Que se logra aplicando algunos principios básicos para su elaboración, tales como: tipo de cemento, agregados con granulometría adecuada, correcta relación agua/cemento, proporcionamiento de materiales que evite la segregación de los agregados, vibrado durante la colocación y tiempo suficiente de encofrado [9].

El propósito de este trabajo es hacer un análisis y valoración, a través de la revisión documental de trabajos académicos, reportes de obra y normativas técnicas, de los factores que influyen en la calidad del concreto usado en la construcción en Nicaragua.

Materiales y métodos

De acuerdo con la Cámara de Urbanizadores de Nicaragua (CADUR), en el país se necesitan 957000,00 viviendas para suplir el déficit habitacional [10]. Sin embargo, según datos extraídos de los informes de periodicidad del Banco Central de Nicaragua (BCN) sobre construcción privada del año 2002 al 2019 [11], el total de viviendas construidas en ese período fue de 76953,00 viviendas (Cuadro 1), que representa el 8% del déficit total. Este valor evidencia que se requieren mayores esfuerzos en el país para incrementar los porcentajes de construcción de vivienda y reducir el déficit habitacional.

Por otro lado, en el año 2022, la casa, representó el 99% del tipo de vivienda en el país, siendo las construcciones de paredes externas con bloque de concreto el material predominante (42,40%), seguido de paredes de madera (14,30%), ladrillo o bloque de barro (10,80%), piedra cantera (10,30%) y adobe/taquezal (8,40%) [12]. Lo anteriormente, destaca la importancia que tiene la construcción de viviendas y de manera especial, las elaboradas de concreto.

Cuadro 1. Viviendas finalizadas por año.

Año	Managua	Resto de ciudades	Total
2002	1808,00	2120,00	3928,00
2003	1617,00	1758,00	3375,00
2004	1508,00	1302,00	2810,00
2005	1227,00	1490,00	2717,00
2006	3090,00	1997,00	5087,00
2007	2011,00	1913,00	3924,00
2008	1872,00	1485,00	3357,00
2009	1278,00	1164,00	2442,00
2010	1694,00	1186,00	2880,00
2011	3122,00	1106,00	4228,00
2012	4924,00	1586,00	6510,00
2013	4728,00	1994,00	6722,00
2014	4356,00	1788,00	6144,00
2015	5972,00	1866,00	7838,00
2016	3388,00	1648,00	5036,00
2017	3230,00	1508,00	4738,00
2018	1801,00	1307,00	3108,00
2019	1321,00	788,00	2109,00
Total	48947,00	28006,00	76953,00

Fuente: [11]

Para el desarrollo de este trabajo, se recolectaron datos disponibles en el Sistema de Bibliotecas de la Universidad Nacional de Ingeniería [13], sobre la caracterización de agregados y cemento, control de calidad y valores de resistencia a la compresión del concreto de tesis realizadas por estudiantes de la Facultad de Tecnología de la Construcción (FTC); información sobre el diseño de mezclas y control de calidad del concreto del proyecto de viviendas de interés social “Bismark Martínez”, para la construcción de 500,00 viviendas en Managua [14]; y el diseño de mezcla de concreto del proyecto “mejoramiento vial mediante construcción de un puente vehicular en el Barrio Enrique Smith y Ciudadela Nicaragua” [15]. Se incluyeron, además, los datos y resultados sobre la elaboración de concreto realizado por Hernández [16]. Todos, con el propósito determinar el grado de asociación de las variables en estudio.

Se identificaron algunos factores que afectan la calidad del concreto tales como: la relación agua/cemento (a/c), relación cemento/agregado (c/a), volumen de pasta de cemento (vp) y la relación agregado grueso/agregado fino (g/f).

Resultados

En el Cuadro 2 se resumen los resultados de la caracterización de los cementos empleados en la elaboración de concreto, siendo el tipo GU (uso general) el mayormente utilizado.

Se observa que el valor del peso específico y tiempos de fraguado de estos cementos (GU) es variado. El menor valor de peso específico fue de 2,81 gr/cm³ y el mayor de 3,17 gr/cm³. Para el caso del cemento tipo HE, la gravedad específica fue de 3,09 gr/cm³ y 3,17 gr/cm³. De acuerdo con la norma ASTM C 1157 [17], todos los cementos cumplen con requerimientos físicos indicados.

Cuadro 2. Caracterización de cementos.

Tesis	Tipo de cemento	Peso específico (gr/cm ³)	Tiempo de fraguado inicial (min)	Tiempo de fraguado final (min)
<i>Aragón Gutiérrez (2017) [21]</i>	Cemex GU	3,15	115,75	256,00
	Cemex plus 5000 (HE)	3,17	130,33	195,00
<i>Barrantes Maradiaga y Mora Molina [22]</i>	Cemex GU	2,90	111,00	406,00
	Cemex GU (Fabricante)	2,85	200,00	295,00
<i>Areas Alegría y Rivera Guido [23]</i>	Cemex GU	2,92	98,00	240,00
<i>Espinosa Pérez y López Antón [24]</i>	Holcim GU	2,94	-	-
<i>Rivas Vega y Rivera Martínez [25]</i>	Cemex GU	3,14	140,00	270,00
<i>Zamora Torrez y Méndez Bonilla [18]</i>	Cemex GU	3,17	125,00	255,00
<i>CYCSA [14]</i>	Cemex GU	2,81	-	-
<i>CYM [15]</i>	Cemex Plus 500 (HE)	3,09	-	-

En el Cuadro 3 se describen las propiedades físicas del agregado fino. Se observa que el banco de préstamo predominante es el cerro Motastepe ubicado en Managua, con valores de gravedad específica entre 2,38 y 2,63, y porcentaje de absorción entre 1,70% y 6,66%. Con respecto al resto de bancos, el valor de gravedad específica varía entre 1,58 y 3,26, mientras que el porcentaje de absorción de agua entre 0,34% y 21,5%.

De acuerdo con lo indicado en la norma ASTM C 33 [17], el módulo de finura (M.F) de la arena debe comprender valores superiores a 2,30 y menores a 3,10. Se observa que en los muestreos de arena Motastepe, de Zamora Torrez y Méndez Bonilla [18], y Obando Carrasco y Romero Sandino [19], presentan un M.F dentro de los parámetros indicados en la norma. Los del resto de muestras Motastepe, son superiores al máximo indicado, por lo tanto, son considerados como arena gruesa [20]. Para el caso de los bancos Miraflores y Los Martínez ubicados en Managua, los valores del MF son de 2,75 y 2,71, respectivamente, encontrándose dentro de los parámetros indicados en la norma.

Cuadro 3. Propiedades físicas del agregado fino.

Propiedades	Aragón Gutiérrez [21]		Barrantes Maradiaga y Mora Molina [22]	Areas Alegría y Rivera Guido [23]			Lanuza Bucardo et al., [26]	Loaisiga López y Zepeda Hernández [27]		Roque Altamirano y Medrano Ruiz, [28]
	San Cristóbal	Agrenic	Motastepe	Miraflores	Los Martínez	Motastepe	Rio Macuelizo	Arena de escoria volcánica	Arena de pomez	Material cero (Estelí)
Densidad volumétrica (kg/m³)	1763,50	1790,97	1554,00	1603,49	1648,92	1408,31	1619,00	1090,00	688,00	1501,32
Gravedad específica	2,94	2,90	2,38	2,80	2,68	2,63	2,46	2,44	1,58	2,29
Absorción de agua (%)	1,39	1,20	6,66	1,82	3,69	1,70	4,13	4,44	21,50	8,74
Módulo de finura (MF)	3,10	2,94	3,40	2,75	2,71	3,18	2,45	-	-	-

Propiedades	Montalván Castillo y Lindo O'connors [29]			Salazar Sequeira y Largaespada Obando	Tórrez Bellorín y Zamora Herrera [31]			Obando Carrasco y Romero Sandino [19]	Zamora Torrez y Méndez Bonilla [18]	CYCSA [14]	CYM [15]
	Concreto rojo Xiloá	Concreto rojo Sub Urbana	Concreto rojo El Varillal	Material "0" (Agrenic)	Arroyo	Matadero	San Caralampio	Motastepe	Motastepe	Motastepe	Material "0" Proinco
Densidad volumétrica (kg/m³)	1150,47	1253,19	1191,54	1680,00	1367,54	1618,20	1435,31	1528,00	1410,00	1517,00	1841,00
Gravedad específica	2,45	2,47	2,37	3,26	2,12	2,44	2,51	2,53	2,52	2,63	2,85
Absorción de agua (%)	3,17	5,62	3,10	0,34	5,13	2,01	2,77	5,75	5,50	2,17	3,09
Módulo de finura (MF)	-	-	-	3,08	2,38	2,55	2,45	2,94	3,03	3,35	3,03

En el Cuadro 4 se muestran las propiedades físicas del agregado grueso. El banco de préstamo más usado fue el Proinco, con TMA de 12,50 mm y 19,00 mm. El menor valor de gravedad específica obtenido fue de 2,64 (1/2" Proinco) y el mayor de 2,91 (3/8" Agrenic). Con respecto al porcentaje de absorción de agua, el menor valor obtenido fue de 1,71% (3/8" Agrenic) y el mayor de 2,57% (1/2" Proinco).

Cuadro 4. Propiedades físicas del agregado grueso.

Propiedades	Barrantes Maradiaga y Mora Molina [22]		Aragón Gutiérrez [21]		Espinosa Pérez y López Antón [24]	Areas Alegría y Rivera Guido [23]	Rivas Vega y Rivera Martínez [25]	Obando Carrasco y Romero Sandino [19]	CYCSA [14]	CYM [15]
	Proinco 1/2"	Proinco 3/4"	San Cristóbal 3/4"	Agrenic 3/4"	Veracruz 1/2"	Proinco 3/4"	Agrenic 3/8"	Proinco 3/4	Proinco 1/2"	Proinco 1/2"
Tamaño máximo (mm)	12,50	19,00	19,00	19,05	12,50	19,00	9,50	19,00	12,50	19,00
Densidad volumétrica (kg/m³)	1453,00	1441,00	1426,18	1486,67	1631,00	1591,00	1460,00	1542,00	1360,00	1600,00
Gravedad específica	2,79	2,81	2,88	2,90	2,85	2,72	2,91	2,69	2,64	2,78
Absorción de agua (%)	2,27	1,98	1,78	2,03	1,49	1,90	1,71	1,92	2,57	1,70

En los Cuadros 5 y 6, se presentan los diseños de mezclas de los concretos elaborados. En el Cuadro 5 se detallan las proporciones de materiales para la elaboración de 1,00 m³ de concreto ordinario con relaciones agua/cemento (a/c) entre 0,55 y 0,82. Se observa que la menor cantidad de cemento empleada fue de 233,80 kg/m³ (a/c de 0,70) y la mayor de 400,00 kg/m³ (a/c de 0,56).

El mayor valor de resistencia a la compresión obtenido fue de 366,00 kg/cm², para una relación a/c de 0,56, relación cemento/agregado (c/a) de 0,22, volumen de pasta de cemento (vp) de 0,34 m³ y relación grava/arena (g/f) de 0,82. Seguido de la mezcla de concreto con 350,70 kg/cm², para una relación a/c de 0,71, c/a de 0,25, vp de 0,41 m³ y g/f de 0,96. El tercer mayor valor fue de 309,00 kg/cm², que presentó una relación a/c de 0,56, c/a de 0,19, vp de 0,32 m³ y g/f de 0,95. El cuarto mejor valor de resistencia fue de 293,00 kg/cm², para una relación a/c de 0,71, c/a de 0,23, vp de 0,41 m³ y g/f de 1,19.

Con los resultados, se realizó una correlación lineal entre variables, obteniendo:

- Volumen de pasta versus g/f, R^2 de 0,63.
- Cemento/agregado versus g/f, R^2 de 0,75.
- Volumen de pasta versus Resistencia a la compresión, R^2 de 0,41.
- Cemento/agregado versus Resistencia a la compresión, R^2 de 0,55.
- g/f versus Resistencia a la compresión, R^2 de 0,25.

Los valores indican que existe relación entre variables que afectan las propiedades del concreto, principalmente en c/a y g/f. Se observa que para valores de g/f entre 1,00 y 0,80, y de c/a mayor a 0,19, la resistencia a la compresión es mayor que 300,00 kg/cm².

En el Cuadro 6 se presentan las proporciones de mezclas de concreto permeable, elaborados únicamente con agregado grueso. El concreto permeable es un material fabricado de manera similar al concreto ordinario, pero utiliza menor cantidad de cemento con poco o sin agregado fino, permitiéndole espacios vacíos entre sus partículas. Es utilizado en zonas de estacionamientos y carreteras de poco tráfico, debido a su capacidad de drenar el agua de lluvia rápidamente al subsuelo [32].

En estos concretos se observa que la resistencia a la compresión es baja con respecto a los concretos ordinarios, presentando valores entre 85,00 kg/cm² y 141,48 kg/cm². La relación a/c utilizada comprende entre 0,32 y 0,38, la relación de c/a entre 0,28 y 0,37, y vp entre 0,28 m³ y 0,38 m³. De manera similar al concreto ordinario, se realizaron correlaciones entre las variables, obteniendo un valor de R^2 de 0,87 para vp versus c/a. El resto de correlaciones presentaron valores de R^2 menores a 0,31.

Estos valores indican que la relación entre el contenido de cemento y agregado, juega un papel importante en el diseño y propiedades de estos concretos.

Con el propósito de ampliar el conocimiento sobre los factores que influyen en la resistencia a la compresión, se evaluaron los diseños de mezclas y resultados del trabajo realizado por Hernández [33] (Cuadro 7). Elaboró mezclas de concreto empleando cemento tipo GU de dos fabricantes (C1 y C2), dos relaciones a/c (0,45 y 0,50) y dos tamaños de agregados (1/2" y 3/4") con dos calidades (A y B). Se observa que las mezclas con los mayores valores de resistencia a la compresión fueron los concretos con a/c de 0,45, agregado de 3/4" y cemento C1. En estas mezclas, la relación c/a y g/f es la misma, mientras que el volumen de pasta es similar.

La diferencia observada en los valores de resistencia se debe principalmente por la relación a/c empleada y el tipo de cemento (fabricante).

Cuadro 5. Proporciones para la elaboración de 1 m³ de mezcla de concreto, y propiedades en estado fresco y endurecido.

Mezcla de Concreto	Aragón Gutiérrez, [21] HE (San Cristóbal) ¾"	Aragón Gutiérrez [21] GU (San Cristóbal) ¾"	Barrantes Maradiaga Mora Molina [22] (Motastepe) ¾"	Areas Alegría y Rivera Guido [23] (Motastepe) GU	Areas Alegría y Rivera Guido [23] (Miraflores) GU	Areas Alegría y Rivera Guido [23] (Los Martínez) GU	Obando Carrasco y Romero Sandino [19] (ACI) GU (Motastepe) ¾"	Obando Carrasco y Romero Sandino [19] (WALKER) GU (Motastepe) ¾"	Obando Carrasco y Romero Sandino [19] (M.F) GU (Motastepe) ¾"
<i>a/c</i>	0,56	0,56	0,56	0,55	0,55	0,55	0,72	0,71	0,71
<i>Grava (kg)</i>	932,49	992,57	781,00	922,78	986,42	1002,33	894,78	953,30	912,18
<i>Arena (kg)</i>	982,31	832,46	955,00	765,33	748,00	702,16	782,00	727,62	765,32
<i>Cemento (kg)</i>	366,07	400,00	383,00	391,30	391,30	391,30	387,09	387,09	387,09
<i>Agua (kg)</i>	205,00	223,36	213,00	216,00	248,35	260,81	278,08	276,13	276,00
<i>Revenimiento (cm)</i>	8,51	10,16	8,25	7,62	8,89	8,89	9,52	9,52	7,62
<i>Temperatura (°C)</i>	32,50	35,70	33,40	-	-	-	-	-	-
<i>Peso volumétrico (kg/cm³)</i>	2454,90	2521,24	2332,00	-	-	-	-	-	-
<i>Curado (días)</i>	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	-	-	-
<i>Cemento/agregado</i>	0,19	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
<i>Volumen de pasta (m³)</i>	0,32	0,35	0,34	0,35	0,38	0,39	0,41	0,41	0,41
<i>g/f</i>	0,95	1,20	0,82	1,21	1,32	1,43	1,14	1,31	1,19
<i>Resistencia a la compresión a 28 días (kg/cm²)</i>	309,43	242,44	366,00	216,21	211,17	180,13	239,00	275,25	293,00

Mezcla de Concreto	Obando Carrasco y Romero Sandino [19] (FULLER) GU (Motastepe) ¾"	Rivas Vega y Rivera Martínez [25] (1:3:2) GU	Rivas Vega y Rivera Martínez [25] (1:3:2) GU	Rivas Vega y Rivera Martínez [25] (1:5:2) GU	Rivas Vega y Rivera Martínez [25] (1:5:2) GU	Rivas Vega y Rivera Martínez [25] (1:2:2) GU	CYCSA [14] GU (Motastepe) ¾"	CYCSA [14] GU (Motastepe) ¾"	CYM [15] HE
<i>a/c</i>	0,76	0,70	0,60	0,70	0,60	0,60	0,82	0,71	0,64
<i>Grava (kg)</i>	883,39	735,60	800,29	604,15	618,61	938,03	728,01	734,53	677,00
<i>Arena (kg)</i>	798,49	1121,90	1193,85	1502,09	1538,05	932,89	930,72	765,30	1352,00
<i>Cemento (kg)</i>	362,00	287,10	309,70	233,80	239,39	363,01	361,33	382,30	290,00
<i>Agua (kg)</i>	276,44	207,00	185,80	163,70	143,60	217,80	296,17	273,08	187,00
<i>Revenimiento (cm)</i>	9,52	-	-	-	-	-	16,51	13,33	15,24
<i>Temperatura (°C)</i>	-	-	-	-	-	-	32,83	35,40	-
<i>Peso volumétrico (kg/cm³)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Curado (días)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cemento/agregado</i>	0,22	0,15	0,16	0,11	0,11	0,19	0,22	0,25	0,14
<i>Volumen de pasta (m³)</i>	0,40	0,30	0,29	0,24	0,23	0,34	0,42	0,41	0,28
<i>g/f</i>	1,11	0,66	0,67	0,40	0,40	1,00	0,78	0,96	0,50
<i>Resistencia a la compresión a 28 días (kg/cm²)</i>	279,80	125,43	132,25	89,71	58,14	158,82	194,25	350,70	210,00

Cuadro 6. Proporciones para la elaboración de 1 m³ de mezcla de concreto, y propiedades en estado fresco y endurecido.

Mezcla de Concreto	Espinosa Pérez y López Antón [24] (0.32-18% vacíos) GU	Espinosa Pérez y López Antón [24] (0.32- 20% vacíos) GU	Espinosa Pérez y López Antón [24] (0.35-18% vacíos) GU	Espinosa Pérez y López Antón [24] (0.35-20% vacíos) GU	Espinosa Pérez y López Antón [24] (0.38-18% vacíos) GU	Espinosa Pérez y López Antón [24] (0.38-20% vacíos) GU	Espinosa Pérez y López Antón [24] (0.38-18 R% vacíos) GU
<i>a/c</i>	0,32	0,32	0,35	0,35	0,38	0,38	0,38
<i>Grava 1/2" (kg)</i>	1556,10	1499,10	1521,90	1464,90	1484,85	1427,85	1332,40
<i>Arena (kg)</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Cemento (kg)</i>	430,00	430,00	430,00	430,00	430,00	430,00	510,00
<i>Agua (kg)</i>	137,60	137,60	150,50	150,50	163,40	163,40	193,80
<i>Revenimiento (cm)</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Temperatura (°C)</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Peso volumétrico (kg/cm³)</i>	2106,48	2063,88	2102,27	2042,27	2068,92	2021,03	2031,37
<i>Curado (días)</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cemento/Agregado</i>	0,28	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,37
<i>Volumen de pasta (m³)</i>	0,29	0,29	0,28	0,29	0,29	0,30	0,38
<i>g/f</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Resistencia a la compresión a 28 días (kg/cm²)</i>	121,36	85,00	130,70	122,00	141,48	126,75	141,48

Cuadro 7. Proporciones para la elaboración de 1 m³ de mezcla de concreto, y propiedades en estado fresco y endurecido.

Mezcla de Concreto	C1-1/2A	C1-1/2B	C2-1/2A	C2- 1/2B	C1-3/4A	C1-3/4B	C2-3/4A	C2-3/4B
<i>a/c</i>	0,50	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45
<i>Grava (kg)</i>	867,00	867,00	867,00	867,00	886,00	886,00	886,00	886,00
<i>Arena (kg)</i>	715,00	715,00	715,00	715,00	734,00	734,00	734,00	734,00
<i>Cemento (kg)</i>	517,00	517,00	517,00	517,00	535,00	535,00	535,00	535,00
<i>Agua (kg)</i>	263,00	263,00	263,00	263,00	242,00	242,00	242,00	242,00
<i>Revenimiento (cm)</i>	20,90	19,90	17,00	22,10	11,00	8,00	17,20	13,60
<i>Temperatura (°C)</i>	34,00	34,00	34,50	34,00	36,00	34,00	34,00	34,50
<i>Peso volumétrico (kg/cm³)</i>	2317,00	2300,00	2325,00	2279,00	2324,00	2295,00	2334,00	2303,00
<i>Cemento/agregado</i>	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
<i>Volumen de pasta (m³)</i>	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,43	0,43	0,43
<i>Grava/arena (g/f)</i>	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21
<i>Resistencia a la compresión a 180 días (kg/cm²)</i>	419,64	402,81	411,40	326,07	442,70	503,78	400,74	401,71

Fuente: [16]

Discusión

De los principales resultados de resistencia a la compresión del concreto ordinario (Cuadro 5), se determinó que el tipo de cemento más empleado es el GU y el banco de arena, el Mostastepe. Las propiedades físicas evaluadas de este árido, indican que es una arena gruesa y absorbente. Con respecto al agregado grueso, los mejores resultados de resistencia se obtuvieron con grava de tamaño máximo de 3/4" (19.0 mm), similar a lo observado en los concretos de Hernández [16].

Con respecto a la relación a/c, los dos valores más altos de resistencia a la compresión se obtuvieron de mezclas con relaciones de 0,56 (366,00 kg/cm²) y 0,71 (350,70 kg/cm²). Para el caso de los concretos con la menor relación a/c (0,55), la resistencia a la compresión fue baja (180,13 kg/cm²) en comparación con el valor más alto obtenido; esto, a pesar de que la diferencia entre relaciones a/c es de 0,01. Al respecto, Mehta y Monteiro [1], indican que, aunque la relación a/c es importante para determinar la porosidad de la matriz cementante y zona de transición interfacial, y así lograr la resistencia a la compresión deseada, hay otros factores de importancia que la afectan, tales como: condiciones de curado, tipo de agregado y granulometría, tipo de aditivos, geometría, condiciones de humedad, tipos de esfuerzos, etc.

Los factores más importantes identificados que influyen en la resistencia del concreto fueron: la relación agua/cemento (a/c), cemento/agregado (c/a) y agregado grueso/agregado fino (g/f). Es decir, que, para garantizar una resistencia a la compresión superior a 210,00 kg/cm², para usarse en losas, zapatas, columnas y vigas, según La nueva cartilla de la construcción de Nicaragua [9], se debería emplear una relación c/a mayor a 0,20, una relación a/c que garantice un volumen de pasta mayor a 0,32 m³ y una relación g/f entre 0,80 y 1,20.

Conclusiones

De la revisión documental se derivaron aspectos importantes a considerar en la elaboración de concreto, especialmente para la construcción de viviendas que cumplan con los requerimientos de calidad indicados en las normativas vigentes. Entre ellos: la procedencia de los agregados y sus propiedades, tipo de cemento, el proporcionamiento de los materiales y el curado.

Los dos tipos de cementos (GU y HE) usados, cumplen con los requerimientos físicos indicados en la normativa vigente. Siendo el fraguado final del cemento tipo HE, menor que el tipo GU. Para el caso de los concretos con igual proporción de mezcla, y elaborados con cementos tipo GU de dos fabricantes (C1 y C2), fue notable la mayor resistencia a la compresión alcanzada por los concretos con cemento C1 en comparación con los C2. Denotando así, la importancia de conocer las propiedades físicas y composición química del cemento, al momento de realizar el diseño de mezcla.

Para el caso de la arena, la más usada fue un tipo de arena gruesa y absorbente. Las mezclas con agregado grueso con el mayor tamaño máximo (3/4"), presentaron los mejores resultados de resistencia a la compresión. Con respecto a los ensayos de control de calidad del concreto, los más usados son: revenimiento, temperatura y resistencia a la compresión a los 28 días.

De manera general, para obtener una resistencia a la compresión deseada, se deben atender los valores indicados en los resultados para las relaciones cemento/agregado, volumen de pasta y relación agregado grueso/agregado fino.

Referencias

- [1] K. P. Mehta and P. J. Monteiro, *Concrete - Microstructure, properties and materials*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2006. doi: DOI: 10.1036/0071462899.
- [2] L. León Consuegra and C. Rodríguez García, "Factores que influyen en la resistencia a la compresión del hormigón . Estado del arte," *Rev. Arquit. e Ing.*, vol. 16, no. 3, p. 12, 2022, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19397295003%0APDF>
- [3] P. Kumar Mehta, "Durability - critical issues for the future," *Concr. Int.*, vol. 19, no. 7, pp. 27–33, 1997.
- [4] E. F. Hernández, "Construcción durable - Una visión de futuro para Nicaragua," *Rev. Arquit. +*, vol. 2, no. 4, pp. 8–12, 2017, doi: 10.5377/arquitectura.v2i4.9139.
- [5] E. F. Hernández, P. F. de J. Cano-Barrita, and A. A. Torres-Acosta, "Influence of cactus mucilage and marine brown algae extract on the compressive strength and durability of concrete," *Mater. Constr.*, vol. 66, no. 321, 2016, doi: 10.3989/mc.2016.07514.
- [6] MTI, "Norma Mínima de Diseño y Construcción de Concreto Estructural (CR-001)," Managua, 2017. [Online]. Available: https://biblioteca.mti.gob.ni:8080/docushare/dsweb/Get/DocumentosTecnicos-509/Norma_Minima_de_Diseño_y_Construcción_de_Concreto_Estructural.pdf
- [7] E. Arce Ruiz, Y. J. Arrechavala Molina, and C. U. Mendoza Membreño, "Fabricación de bloques usando como agregado la piedra pómez," pp. 1–188, 2009, [Online]. Available: <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/9616>
- [8] MTI, "Norma Mínima de Diseño y Construcción de Mampostería (MP-001)," 2017. [Online]. Available: https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/norma-minima-mamposteria_mti-mp-001.pdf
- [9] MTI, "Nueva cartilla de la construcción," 2014, [Online]. Available: https://biblioteca.mti.gob.ni:8080/docushare/dsweb/Get/DocumentosTecnicos-61/Nueva_Cartilla_de_la_Construcción_Cap_I.pdf
- [10] A. H. Williams Centeno and J. A. Wilson Maybit, "Manifestaciones psicosociales asociados al hacinamiento en pobladores mayores de 15 años en el barrio Fundeci, León durante el período de febrero a junio 2020," Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, 2021. [Online]. Available: <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/9215/1/247390.pdf>
- [11] BCN, "Informe de construcción privada." [Online]. Available: https://bcn.gob.ni/publicaciones/construcción_privada
- [12] INIDE, "Informe de vivienda Encuesta continua de hogares 2021-2022," Managua, 2023. [Online]. Available: https://www.inide.gob.ni/docs/Ech/ech_vivienda21_22/INFORME_DE_CARACTERISTICAS_DE LAS_VIVIENDAS_2021_2022.pdf
- [13] SIBIUNI, "Sistema de bibliotecas de la Universidad Nacional de Ingeniería." [Online]. Available: <https://ribuni.uni.edu.ni/>
- [14] CYCSA, "Diseño de mezcla de concreto," 2021.
- [15] CYM, "Diseño de mezcla," 2022.
- [16] E. F. Hernández, "Efecto del agregado grueso triturado en las propiedades del concreto," *Nexo Revista Científica*, vol. 34, no. 05. pp. 56–63, 2021. doi: 10.5377/nexo.v34i05.13109.
- [17] ASTM, "Annual Bo-of ASTM Standards, Section Four, Construction, Volume 04.2 Construction, Concrete and Aggregates." 2015.
- [18] M. M. Zamora Torrez and R. A. Méndez Bonilla, "Estudio comparativo entre las propiedades del mortero de cemento convencional y el mortero de cemento con aditivo RMIX111 de resistencia a compresión minima de 2000 psi al emplearlo en paneles de Covintec," Universidad Nacional de Ingeniería, 2015. [Online]. Available: <https://ribuni.uni.edu.ni/1964/>
- [19] F. R. Obando Carrasco and Y. M. Romero Sandino, "Análisis comparativo de mezclas de concreto haciendo uso de los métodos A.C.I 211, Método de Walker, Método de Fuller, y Método del Módulo de Finura de los agregados, 2019," Universidad Nacional de Ingeniería, 2020. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/3521/1/94775.pdf>
- [20] S. Guerra San Martín, "Determinación de la Influencia del Módulo de Finura de la Arena sobre la Demanda de Agua, la Absorción de agua y la Resistencia a Compresión del Hormigón," Universidad de Valparaíso, 2015. [Online]. Available: https://repositoriobibliotecas.uv.cl/bitstream/handle/uvsc1/2788/Guerra_San_Martín_Sihomara_Determinación_de_la_influencia_del_módulo_de_finura_de_la_arena_sobre_la_demanda_de_agua_la_absorción_de_agua_y_la_resistencia_a_compresión_del_hormigón.pdf?seq=1

- [21] B. V. Aragón Gutiérrez, "Estudio comparativo de las propiedades físico-mecánicas de mezclas de concreto de 3000 psi con aditivo RMIX S30 y mezclas de concreto de 3000 psi sin uso de aditivos," Universidad Nacional de Ingeniería, 2017. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/4543/>
- [22] M. Barrantes Maradiaga and K. Mora Molina, "Análisis Comparativo Del Comportamiento Físico-Mecánico De Un Concreto Hidráulico Fabricado Con Agregados Reciclados Y Un Concreto Hidráulico Convencional," Universidad Nacional de Ingeniería, 2018. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/2474/>
- [23] M. J. Áreas Alegría and M. A. Rivera Guido, "Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas del agregado fino de los bancos de Motastepe, Miraflores y Los Martínez para ser utilizados en proyectos de construcción en la ciudad de Managua," Universidad Nacional de Ingeniería, 2021. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/4375/>
- [24] O. R. Espinoza Pérez and E. R. López Antón, "Diseño de mezcla de concreto permeable con agregados del banco de préstamo Veracruz, cemento portland tipo GU (ASTM- C1157) y fibras de polipropileno para pavimentos rígidos," Universidad Nacional de Ingeniería, 2018. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/2623/>
- [25] J. L. Rivas Vega and K. L. Rivera Martínez, "Estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de unidades de bloques de concreto con unidades de bloques de mortero," Universidad Nacional de Ingeniería, 2019. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/3429/1/93757.pdf>
- [26] R. M. Lanuza Bucardo, M. B. Betanco Gadea, and C. J. Parrilla Torres, "Estudio y fabricación de ladrillo reciclado," Universidad Nacional de Ingeniería, 2021. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/4032/1/95462.pdf>
- [27] G. A. Loaisiga López and J. M. Zepeda Hernández, "Análisis comparativo técnico-económico de unidades de bloques empleando mezcla de agregados de arena pómex y arena de escoria volcánica color roja, con unidades de bloque de agregados de peso normal," Universidad Naciona de Ingeniería, 2013. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/1373/1/39716.pdf>
- [28] H. M. Roque Altamirano and J. M. Medrano Ruiz, "Estudio de viabilidad técnica y económica del bioconcreto a base de cascarilla de café en la fabricación de bloques," Universidad Nacional de Ingeniería, 2015. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/3483/1/90004.pdf>
- [29] A. C. Montalván Castillo and S. I. Lindo O'connors, "Estudio Técnico – Económico Comparativo de la Elaboración de Bloques de Peso Normal con Bloques Fabricados a Base de Hormigón Rojo," Universidad Nacional de Ingeniería, 2013. [Online]. Available: <https://ribuni.uni.edu.ni/3485/>
- [30] J. C. Salazar Sequeira and M. S. Largaespada Obando, "Estudio y revisión de control de calidad de bloques de concreto elaborados en 5 fabricas semi-industriales en la ciudad de Managua," Universidad Nacional de Ingeniería, 2021. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/4163/1/96062.PDF>
- [31] C. M. Tórrez Bellorín and C. J. Zamora Herrera, "Análisis comparativo de las propiedades físico y mecánico, de los agregados finos de bancos de materiales ubicados en el municipio de Nandaime utilizando como arena patrón el banco de materiales de Motastepe," Universidad Nacional del Ingeniería, 2020. [Online]. Available: <http://ribuni.uni.edu.ni/3891/1/95272.pdf>
- [32] O. Patiño, "El concreto permeable: uso y estándares," *Mente Mater.*, vol. 4, pp. 22–23, 2013, [Online]. Available: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/mente-y-materia/article/view/339/pdf>
- [33] E. F. Hernández, "Efecto del agregado grueso triturado en las propiedades del concreto," *Nexo Rev. Científica*, vol. 34, no. 05, pp. 56–63, 2021, doi: 10.5377/nexo.v34i05.13109.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Evaluación económica de la producción de huevo fértil. Caso de estudio en Costa Rica

Economic evaluation of fertile egg production. Case study in Costa Rica

Johanna Solórzano Thompson¹, Javier Paniagua Molina², Tatiana Solano Pereira³, Royner Arce Carrillo⁴, David Brenes Navarro⁵

Fecha de recepción: 23 de mayo, 2024
Fecha de aprobación: 6 de setiembre, 2024

Solórzano Thompson, J; Paniagua Molina, J; Solano Pereira, T; Arce Carrillo, R; Brenes Navarro, D. Evaluación económica de la producción de huevo fértil. Caso de estudio en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 89-99.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7157>

- 1 Docente e Investigadora, Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica
 johanna.solorzano@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0276-68493>
- 2 Docente e Investigador, Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica
 javier.paniagua@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2815-5437>
- 3 Docente e Investigadora, Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica
 tatiana.solanopereira@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3892-3471>
- 4 Trabajador de empresa privada, Heredia. Costa Rica
 royner.arce@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0006-0188-3783>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica
 dbrenes@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0006-0188-3783>

Palabras clave

Cría de pollo; viabilidad económica; viabilidad técnica; viabilidad financiera; raza Cobb.

Resumen

El consumo de carne de pollo y huevo de gallina ha aumentado en la última década y se ha convertido en elemento esencial de la dieta de los costarricenses; de esta manera, el mercado se encuentra liderado por pocas empresas, las cuales están integradas de diferentes maneras para llegar a la mesa del consumidor. El objetivo de este estudio fue realizar una evaluación económica de la producción de huevo fértil mediante el uso de reproductoras pesadas de la raza Cobb a través de un estudio de caso, donde se aplicó un análisis de los requerimientos técnicos y económicos para una producción de más de 30 mil aves en granja para el año 2031. Los resultados demostraron que existe viabilidad técnica y económica en el horizonte de evaluación.

Keywords

Chicken breeding; economic viability; technical viability; financial viability; Cobb breed.

Abstract

The consumption of chicken meat and chicken eggs has increased in the last decade and has become an essential element of the Costa Rican diet. In this way, the market is led by a few companies which are integrated in different ways to reach the consumer's table. Due to its importance, the aim of this study was carried out an economic evaluation of the production of fertile eggs using heavy breeders of Cobb breed by a case study where was analyzed the requirements of a production of more than 30 thousand farmer birds by 2031. The results were demonstrated that technical and economic viability was positive for an evaluation horizon of 10 years.

Introducción

La producción de carne de pollo ha aumentado en los últimos 10 años gracias al crecimiento demográfico y al aumento en el ingreso de los países en desarrollo, asimismo, es la carne más consumida a nivel mundial [1]. De acuerdo con OCDE/FAO [2] se estima un crecimiento en el consumo per cápita de pollo para el 2026, que supera a las demás carnes y representará cerca del 45% de toda la carne adicional consumida durante esta década.

Para el año 2022, la producción se encuentra liderada por Estados Unidos (20 millones de toneladas), China (15 millones de toneladas) y Brasil (14,5 millones de toneladas), mientras que en Costa Rica se produjeron para el mismo año 152 200 toneladas [1], [3].

En el país destacan tres empresas productoras de pollo de engorde principalmente de la raza Cobb, que abarcan alrededor del 90% de la producción total con cerca de 75 millones de pollos anuales [4]. De acuerdo con Cordero [5], el valor bruto de la producción de pollitos de un día en el 2017 era de 49 463 572 dólares. De los cuales, el 83,66% se destina al engorde, el 10,09% a la exportación y el 6,25% a la postura comercial. Además, se estimó que el valor bruto de la producción de pollo de engorde en pie para ese mismo año fue de aproximadamente 295 776 338 dólares, a partir de datos de cantidad y peso al sacrificio, existencias de inventarios y precios a esa fecha.

En cuanto a la producción de huevo de gallina fresco, el mayor crecimiento a nivel mundial de consumo per cápita se ha dado en Asia y en América Latina, para el año 2022, China lidera la producción mundial con cerca de 592 billones de unidades, seguido de Indonesia (132 billones de toneladas) e India (119 billones de unidades); a nivel local, Costa Rica reportó 1,3 billones de unidades [1], donde el 25% proviene de micro, pequeñas y medianas granjas [6]

Existen 18 empresas y granjas que están asociadas a la Cámara Nacional de Avicultores (CANAVI) y que producen actualmente alrededor del 60% de la producción del país. Existen también tres principales empresas, con más de 1 millón de ponedoras en producción, todas ellas de razas Isa Brown y Hy-Line [6]. Así mismo, las estimaciones de Cordero [5] del valor de la producción de huevo comercial para el 2017 fue de 79 633 748 dólares.

El huevo de gallina y la carne de pollo representan casi el 50% de la proteína de origen animal que se consume en el país. Cerca del 71% de las personas consume carne de pollo de 1 a 3 días a la semana, lo que representa más de 20 kilogramos por persona por año [7]. Además, se consumen entre 225 a 245 huevos por persona por año [8], [9]. En ambos casos existe gran versatilidad para preparaciones alimenticias y son parte esencial de la dieta de los costarricenses.

En los estudios existentes acerca de la producción de huevo, destacan principalmente los relacionados con manejo productivo del sistema, análisis técnicos en la producción (enfermedades, nutrición, genética), análisis de los costos e inversiones, así como la determinación de la rentabilidad esperada bajo diferentes escenarios tanto para la producción de huevo de pastoreo como de huevo en jaula.

Desde el enfoque técnico se destacan aspectos esenciales como lo son los análisis de costos y eficiencia técnica, Piran et al [3] utilizaron el análisis envolvente de datos para la determinación de la reducción del costo de producción por unidad, así mismo, Pakage et al [10] aplicaron modelos de estimación de costos, función de producción, así como la frontera estocástica de producción, con el fin de comprobar como el alimento, medicina, y aves de un día, afectan positivamente la producción de pollos de engorde, por otro lado, Abdurofi et al [11], presentaron una estimación de costos y elaboración de presupuestos con el fin de determinar la reducción de los costos mediante la eficiencia en el uso de los alimentos. También, se encuentran análisis de los precios y mercados como Umboh y Kalangi [12] quienes cuantificaron la transmisión de precios en la cadena de valor, por medio del uso de bloques de precios para determinar cómo los cambios en la producción definen cambios en el uso de materias primas relacionadas.

Los modelos de análisis financiero se basan en el uso de indicadores financieros para medir la rentabilidad del sistema de producción por medio del uso de diversas variables, Simões et al [13] utilizaron los elementos financieros de valor presente neto y análisis de sensibilidad para determinar como el mejor rendimiento financiero se obtiene en granjas con bajos niveles tecnológicos y con una menor inversión financiera. Mendes et al [14], mediante el análisis de costo-beneficio, y el uso de elementos estadísticos como el coeficiente de correlación de Pearson, manifestaron como el nivel educativo, tamaño de las instalaciones, mano de obra, los ingresos brutos por lote y el peso promedio de las aves al momento del sacrificio, tuvieron un impacto positivo en el desempeño financiero.

A su vez, existen modelos para la determinación de la eficiencia económica del sistema productivo, Maldonado [15] genera una función de producción y costos de una granja, así como Osti et al [16] utilizó técnicas de regresión múltiple y análisis financieros para comprobar como fincas grandes poseen mejores niveles de producción y una menor tasa de conversión del alimento, lo que genera mayores ganancias. Carvalho et al [17] por medio del uso de la

frontera estocástica utilidad establece que el costo de la electricidad, área de tierra ocupada, la escala de producción y el consumo de alimento afectan significativamente la eficiencia económica de las granjas de reproductoras.

La producción de huevo fértil en la actualidad se realiza a través de modelos artificiales de incubación, dado que los procesos naturales son menos eficientes [18], de acuerdo con Nilipour [19], el huevo fértil es un organismo vivo, por eso se requiere una serie de cuidados tanto en los animales reproductores, como en el manejo posterior, con el fin de asegurar un porcentaje de incubabilidad óptimo. Estos cuidados deben estar enfocados en el proceso de manejo y almacenamiento, así como en el transporte, esto debido a que la mortalidad podría verse afectada por una mala manipulación [20], las condiciones de inocuidad e higiene por lo tanto, son de gran importancia para garantizar indicadores óptimos de producción, en este sentido, es fundamental tener calibrados factores como la temperatura, humedad relativa, oxígeno disponible, así como la frecuencia de volteo de los huevos durante el proceso [21]

Dado que la incubación es el proceso por medio del cual el embrión del huevo finaliza su desarrollo morfológico (que inicia a lo interno de la gallina), si éste es artificial, se debe ofrecer condiciones similares al proceso natural. Este periodo es en promedio de 21 días, de los cuales 18 días permanece en incubadora y tres días en nacadora [22]

La raza Cobb, se caracteriza por tener un proceso de engorde más eficiente con una menor conversión alimenticia, es por esto que, para garantizar el éxito productivo en el manejo de las reproductoras, se debe gestionar correctamente el peso corporal, por lo que el proceso de alimentación y nutrición se debe realizar con mucho cuidado según la edad de los individuos y la uniformidad del lote; por otra parte, para garantizar buenos resultados los machos deben criarse por separado de las hembras, hasta las 20 o 21 semanas [23].

Otros aspectos técnicos necesarios para el manejo de las reproductoras son el control del medio ambiente (temperatura, calidad del aire, ventilación e iluminación), condiciones del galpón en términos de espacios de los nidos, comederos, bebederos, espacios de piso y camas, así como un buen manejo de sanitario para el control de enfermedades y plagas [24].

Con base en lo anteriormente expuesto, la reproducción juega un papel fundamental en el aseguramiento de la producción de carne y de huevo para consumo humano. Además, según la Revista Industria Avícola [6], algunos avicultores costarricenses exportan huevos fértils hacia Nicaragua y Panamá, lo que representa una oportunidad de negocio para la oferta local, por esta razón, el objetivo de este estudio fue el de realizar una evaluación económica de la producción de huevo fértil, mediante el uso de reproductoras pesadas de la raza Cobb, a través de un estudio de caso.

Metodología

El estudio se realizó con una empresa dedicada a la producción de carne de pollo en la provincia de Alajuela. Se aplicaron encuestas semiestructuradas con la combinación de preguntas abiertas y cerradas, así como el uso de reformulación de preguntas y la profundización en los temas a personas claves de la empresa, quienes tienen amplio conocimiento del mercado y de la producción [25]. La recolección de información secundaria como cotizaciones referentes a las inversiones, costos y gastos requeridos se llevó a cabo mediante la búsqueda en bases de datos, sitios especializados de venta de equipos y materiales en internet, así como bibliografía del sector avícola.

Para establecer el precio de venta, se tomó como referencia el precio de compra por huevo fértil importado desde Panamá y puesto en granja, correspondiente a \$0,41 dólares para el año 2021. Lo anterior, dado que, la empresa en cuestión lo realiza de esta manera actualmente.

Posteriormente, se aplicó un ajuste inflacionario de acuerdo con la variación interanual reportada por el Banco Central de Costa Rica de los últimos cinco años [26], misma que también se utilizó en la proyección de costos. El cálculo del precio de venta proyectado en el horizonte de tiempo de evaluación se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$P_n = P_m * (1 + i) \quad (1)$$

Donde:

P_n : Precio de venta; P_m : Precio del año anterior; i : Promedio ajuste inflación

Se calcularon los costos de producción con base en los elementos del costo, tales como materiales directos (MD), mano de obra directa (MOD) y costos indirectos de producción (CIP), a través de la siguiente ecuación de costo total (CT):

$$CT = MD + MOD + CIP \quad (2)$$

Para la valoración financiera y el cálculo del riesgo del negocio, se utilizó una tasa de costo de capital por el método de valuación de activos de capital (CAPM) [27], para reflejar la rentabilidad mínima que deberá exigir el inversionista, según los elementos de riesgo que presente la actividad, sujeto a variables económicas del entorno. Dado que en Costa Rica no existen datos de rendimiento de mercado para sistemas especializados de producción de aves de corral, se adapta la información de otras economías internacionales al entorno costarricense, mediante las siguientes ecuaciones de acuerdo con Brealey et al [28]:

$$\text{Beta extranjera desapalancada: } \beta_u = \frac{\beta_L}{[1 + (1 - T) * \frac{D}{E}]} \quad (3a)$$

Donde:

β_u : Beta desapalancada; β_L : Beta apalancada; T : Tasa de impuesto de renta empresa extranjera; D/E : razón deuda/capital de la empresa extranjera.

$$\text{Beta extranjera desapalancada: } B_n = \beta_u \left[1 + (1 + T) * \frac{D}{E} \right] \quad (3b)$$

Donde:

β_n : Beta nacional apalancada; β_u : Beta desapalancada; T : Tasa de impuesto de renta empresa nacional; D/E : razón deuda/capital de la empresa nacional.

$$\text{Tasa de costo de capital: } = R_f + \beta (R_m - K_e R_f) + R_p \quad (3c)$$

Donde:

K_e : Tasa de costo de capital del proyecto; R_f : Tasa libre de riesgo; β : Beta apalancada; γ : Tasa de rendimiento del mercado; R_p : Tasa de riesgo país.

Se utilizaron las tasas de riesgo desapalancadas y ajustadas por el efecto del dinero en efectivo de las empresas del sector agrícola y pecuario en mercados emergentes de 0,78 presentado por Aswath Damodaran [29]. Lo anterior, dado que Costa Rica no cuenta con un mercado de valores ampliamente desarrollado, que contenga cotizaciones de acciones de compañías relacionadas con los agronegocios, ni patrimonios de las empresas costeados a valor presente. Además, se utilizó un indicador de deuda/patrimonio del 60%, como reflejo de que en el sistema bancario nacional se generan préstamos para este tipo de negocios que oscilan entre el 50 y 60% sobre el valor de la inversión inicial. La tasa libre de riesgo de Costa Rica del 4,62%, inflación esperada según el Programa Monetario del banco Central de Costa Rica del 4% y la inflación promedio de Estados Unidos de Norteamérica de 2,26% (sin incluir el efecto superinflacionario de finales del año 2022). Finalmente, se aplicó una tasa impositiva del 30%⁶ durante todo el periodo de evaluación.

El análisis financiero se estructuró con un horizonte de tiempo de 10 años y fue el insumo para la construcción de los flujos de caja del proyecto en diferentes escenarios de riesgo. Se asumen dos escenarios, sin financiamiento, donde la empresa costeará todas las inversiones requeridas y con financiamiento al 60% con una tasa de interés del 6,55% anual por un plazo de diez años.

El cálculo del valor actual neto se obtuvo aplicando la siguiente fórmula [30]:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t - E_t}{(1 + i)^t} - I_0 \quad (4)$$

Donde:

Y_t : representa el flujo de ingresos del proyecto

E_t : representa los egresos del proyecto

i : representa la tasa de descuento

I_0 : es la inversión inicial

t : vida útil del proyecto

La TIR (Tasa Interno de Retorno) se calcula de la siguiente manera [30]:

$$TIR = \sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1 + i)^t} = 0 \quad (5)$$

Donde:

BN_t : representa el beneficio neto del flujo en el periodo t

i : la tasa de descuento.

6 De acuerdo con el Ministerio de Hacienda de Costa Rica. <https://www.hacienda.go.cr/>

I_0 : es la inversión inicial

n : vida útil del proyecto

Resultados

La línea de proceso inicia por la recepción de las aves y toma en cuenta los elementos necesarios para la nutrición, insumos veterinarios, así como los insumos y equipos para la alimentación que garantizan indicadores exitosos de peso corporal, y el ambiente adecuado para su desarrollo.

Las hembras y machos se criaron por separado, hasta llegar al proceso de despiece y vacunación entre los cuatro y cinco días de edad, para pasar a una etapa de reunificación para lotes de 24 semanas; una vez pasado este tiempo, se inicia la producción de huevos, los cuales se almacenan por dos días, para la posterior recolección. Diariamente los operarios colocan alimento y agua, revisión de niples y comederos, así como la revisión de la temperatura a 21°C, las cortinas y la luz. El huevo fértil recolectado se almacena en un cuarto climatizado especializado para huevos.

Para esta investigación se trabajó con aves de más de 20 días de nacidas, tanto en levante como en producción, colocando 11 pollitas por metro cuadrado para determinar la capacidad instalada, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Carga de aves por metro cuadrado según la edad

Edad (días)	Pollitas / m ²
1 – 3	50 - 70
4 – 6	40 - 60
7 – 9	30 - 50
10 – 12	20 - 40
13 – 15	10 - 30
16 – 19	20
> 20	10-11

Fuente: Cobb (2022)

De esta manera, se estimó que, con una mortalidad promedio del 5%, para el 2031 se tendría que albergar 37 503 aves en la granja, por lo que se necesitará un área de 2 474 m² exclusivamente para las aves de producción. Para las pollitas de levante, que se trasladarán a las 16 semanas al área de postura, se requerirá de la misma área que para las reproductoras. Además, para cubrir el total de reproductoras, al 2031 se estima un requerimiento de 3 638 machos reproductores, que necesitarán una caseta de 330 m².

Para el tamaño de esta producción se requiere realizar inversiones (tabla 2) en infraestructura que corresponden a un área total de 5 278 m² e incluye galpón de crianza, galpón de producción, galpón para machos, bodega de concentrados, también de equipo de producción (hidro lavadora, despicadoras, cuarto de frío), así como mobiliario y equipo de oficina. El monto estimado de depreciaciones es de US\$85 039,74, con valor de residual al final del proyecto de US\$1 633 146 Adicionalmente, se incluye un capital de trabajo para un periodo de 24 semanas al inicio por la suma de US\$241 608,15.

Tabla 2. Inversiones en activos fijos del proyecto en dólares estadounidenses.

Tipo de activo	Costo de compra	Depreciación anual
Edificaciones	2 452 376,50	81 923,03
Equipo	99 132,08	2 897,40
Mobiliario	2 838,60	219,31
Total	2 554 347,18	85 039,74

Para la operación, se calcularon los costos directos e indirectos de las etapas de levante o crianza y postura de los reproductores que se presentan en la tabla 3, y están conformados por la alimentación de las aves, mano de obra, alquiler de finca, servicios públicos, elementos de bioseguridad, gas, mantenimiento, granza de arroz, regencia veterinaria, certificado veterinario, depreciaciones, programa sanitario y veterinario.

Además, se presenta la producción en unidades de huevo fértil proyectada, de acuerdo con la cantidad de aves en granja y la estandarización de la producción por etapas (edad de las aves) para cada año.

Tabla 3. Costo de producción totales y unitarios de huevo fértil en dólares estadounidenses

Año	Costos		Costo total	Producción (uds)	Costo unitario
	Directos	Indirectos			
Año 1	734 146,91	135 928,88	870 075,79	2 566 256	0,34
Año 2	769 970,94	136 245,06	906 216,00	4 210 480	0,22
Año 3	729 971,75	136 565,08	866 536,83	4 687 384	0,18
Año 4	883 438,70	136 889,00	1 020 327,70	4 539 438	0,22
Año 5	755 906,00	137 216,85	893 122,85	4 235 781	0,21
Año 6	882 152,46	137 548,69	1 019 701,16	4 738 552	0,22
Año 7	927 223,11	137 884,57	1 065 107,68	4 539 438	0,23
Año 8	784 482,24	138 224,53	922 706,77	4 235 781	0,22
Año 9	747 640,60	138 568,62	886 209,22	4 738 552	0,19
Año 10	934 518,66	138 916,90	1 073 435,57	4 539 438	0,24

De acuerdo con los resultados de la tabla 4, el escenario dos provee mejores indicadores de evaluación, esto debido al efecto del apalancamiento financiero generado por el endeudamiento del 60% de las inversiones necesarias para el proyecto, según los supuestos planteados. El análisis de sensibilidad financiera demostró que aumentos de más de un 1% en los costos o disminuciones de más de un 7% en los ingresos ocasionan que el VAN sea negativo para este caso de estudio. Debido a la necesidad de estabilizar la producción no se alcanza ganancia en el primer año, de esta manera se requiere un horizonte de evaluación superior y es positivo a partir del segundo año, en este sentido, Barrezueta [31] realizó una evaluación a 14 meses y determina que no es rentable en ese periodo

Tabla 4. Resultados de los indicadores financieros para los escenarios planteados

Rubro	Escenario 1	Escenario 2
K_e	17,45%	17,45%
VAN	\$ 352 794,11	\$1 499 505,26
TIR	20,26%	98,3%
Sensibilidad	+1% costos -7.5% ingresos	

En concordancia con las perspectivas de crecimiento en el consumo mundial de carne y huevo de aves y, por consiguiente, en la producción [2], los sistemas productivos deben ser cada día más eficientes y rentables. Los costos directos son, sin duda, la parte más importante del costo total de operación de una granja con estas características, los cuales son cercanos al 80%, de igual forma que los estudios hechos por Barrezueta [31] y Rosero [32]. En estos, los costos de alimentación representan más del 60% y dado que en el país se importa el 99% del maíz para consumo animal [1], es el rubro que presenta mayor riesgo financiero para el productor, sobre todo al variar por factores externos.

Conclusiones

El modelo de producción de huevo fértil propuesto por la empresa y evaluado en sitio a través de esta investigación resulta ser técnica y financieramente viable. Para empresas que desarrollan en este sector es fundamental controlar el costo de los insumos de la producción, principalmente en cuanto a alimento se refiere. Por su parte, dado que pocas empresas se dedican a la producción de huevo fértil y, en su mayoría, lo producen para autoconsumo en granja, resulta un mercado de oportunidad y crecimiento, tal y como lo han previsto los organismos internacionales.

Agradecimientos

Se agradece al departamento de Economía Agrícola y Agronegocios de la Universidad de Costa Rica por proporcionar el recurso humano para esta investigación y al Centro de Investigación en Economía y Desarrollo Agroempresarial (CIEDA) por la logística. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación C3231 “Modelación cuantitativa para la toma de decisiones económicas, estratégicas, comerciales y operativas en el sector agroalimentario”, registrado en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations, “FAOSTAT”, 2022. Accedido: 10 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
- [2] OCDE/FAO, “Carne”, en OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2017-2016, París: OCDE, 2017
- [3] F.S. Piran, D.P. Lacerda, A.S. Camanho, A. S. y M.C. Silva, “Internal benchmarking to assess the cost efficiency of a broiler production system combining data envelopment analysis and throughput accounting”, International Journal of Production Economics, vol. 238, 108173, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108173>
- [4] A. Vargas Céspedes, K. Serrano Chaves, W. Watler, M. Morales y R. Vignola, “Prácticas Efectivas para la Reducción de Impactos por Eventos Climáticos en Costa Rica. Ficha Técnica: Sector Productivo Avícola”, CATIE, MINAE, DCC, AF, Fundecooparación, Universidad de Costa Rica, 2018.
- [5] K.S. Cordero Garro, “Estimación del Valor Bruto de Producción de la Actividad Cría de Aves”, Banco Central de Costa Rica, 2021

- [6] Revista Industria Avícola, "Costa Rica: Pollo y huevo dedicados básicamente al consumo interno", Watt Industria Avícola, 1 de marzo de 2013. Accedido: 10 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.industriaavicala.net/mercados-y-negocios/costa-rica-pollo-y-huevo-dedicados-basicamente-al-consumo-interno/>
- [7] A. Rodríguez, "71% de costarricenses consume pollo de 1 a 3 días a la semana", La Nación, 12 de junio de 2014. Accedido: 10 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nacion.com/economia/71-de-costarricenses-consume-pollo-de-1-a-3-dias-a-la-semana/LUYOHOFFFDBATTPHCSOGZPP4DPU/story/>
- [8] S. Chaves, "Consumo de huevo en Costa Rica ha incrementado un 20% en la última década", MSD Animal Health, 31 de agosto de 2022. Accedido: 23 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.msd-salud-animal.com.pa/consumo-de-huevo-en-costa-rica-ha-incrementado-un-20-en-la-ultima-decada/>
- [9] Servicio Nacional de Salud Animal, "Celebración Día Mundial del Huevo", 14 de octubre de 2022. Accedido: 23 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.senasa.go.cr/informacion/noticias/507-celebracion-dia-mundial-del-huevo>
- [10] S. Pakage, B. Hartono, Z. Fanani, y B.A. Nugroho, "Analysis of technical, allocative and economic efficiency of broiler production using closed house system in Malang District of East Java Indonesia", Livestock Research for Rural Development, vol. 27, n° 9, 2015.
- [11] I. Abdurofi, M.M. Ismail, H.A. Kamal y B.H. Gabdo, "Economic analysis of broiler production in Peninsular Malaysia", International Food Research Journal, vol. 24, n° 4, pp. 1387-1392, 2017.
- [12] S.J.K. Umboh y J.K.J. Kalangi, "Economic Analysis of Broiler Meat Price Changes in Indonesia", Journal of Agricultural Extension, vol. 3, n° 3, pp. 151-157, 2019, <https://doi.org/10.22377/AEXTJ.V3I3.182>
- [13] D. Simões, J.P. Ribeiro, P.R. Gouveia y J.C. dos Santos, "Economical and financial analysis of aviaries for the integration of broilers under conditions of risk", Ciencia e Agrotecnologia, vol. 39, n° 3, pp. 240-247, 2015, <https://doi.org/10.1590/S1413-70542015000300005>
- [14] A.S. Mendes, D.C. Gudoski, A.F. Cargnelutti, E.J. Silva, E.H. Carvalho y G.M. Morello, "Factors that impact the financial performance of broiler production in southern states of Paraná, Brazil", Revista Brasileira de Ciencia Avicola, vol. 16, n° 1, pp. 113-119, 2014, <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2014000100016>
- [15] Ó. Maldonado, "Estimación de función de producción para pollo de engorde Cobb 500", Tesis de grado, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, 2021. Accedido: 12 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/dc5627c3-9957-4b5e-a330-65e7ecad3374/content>
- [16] R. Osti, D. Zhou, V. Singh, D. Bhattachary y H. Chaudhary, "An economic analysis of poultry egg production in Nepal", Pakistan Journal of Nutrition, vol. 15, n° 8, pp. 715-724, 2016, <https://doi.org/10.3923/pjn.2016.715.724>
- [17] E.H. Carvalho, J.B. Zilli, A.S. Mendes, G.M. Morello y D.V. Bonamigo, "Main factors that affect the economic efficiency of broiler breeder production", Revista Brasileira de Ciencia Avicola, vol. 17, n° 1, pp 11-16, 2015, <https://doi.org/10.1590/1516-635x170111-16>
- [18] J. Rodríguez Moya y A.I. Cruz Bermúdez, "Factores que afectan la incubabilidad de huevo fértil en aves de corral", Nutrición Animal Tropical, vol. 11, n° 1, pp. 16-37, 2017, <https://doi.org/10.15517/nat.v11i1.28295>
- [19] A. Nilipour, "Óptimo manejo del huevo fértil", Selecciones avícolas, vol. 36, n° 10, pp. 0659-0664, 1994.
- [20] L. Vaca Adam, "Producción avícola", 1era ed. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia, 1991
- [21] P.E. Givisiez, R.L. Furlan, E.B. Malheiros y M. Macari, "Incubation and rearing temperature effects on Hsp70 levels and heat stress response in broilers", Canadian Journal of Animal Science, vol. 83, n° 2, pp. 213-220, 2003, <https://doi.org/10.4141/A02-038>
- [22] N. Ruíz Díaz, G. Orrego, M. Reyes y M. Silva, "Aumento de la Temperatura de Incubación en Huevos de Gallina Araucana (Gallus inauris): Efecto sobre la Mortalidad Embrionaria, Tasa de Eclosión, Peso del Polluelo, Saco Vitelino y de Órganos Internos", Journal of Morphology, vol. 34, n° 1, pp. 57-62, 2016, <https://doi.org/10.4067/S0717-95022016000100009>
- [23] Cobb, "Reproductoras Cobb. Guía de Manejo", 2022. Accedido: 14 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cobb-vantress.com/assets/Cobb-Files/cff8d901a4/Cobb-Breeder-Guide-Spanish.pdf>
- [24] M. Longley, "Persistencia en la Hembra Despues del Pico de Producción: Manejo de la Fertilidad y la Producción", AviagenBRIEF, agosto de 2013. Accedido: 14 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://es.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Spanish_TechDocs/AviagenBriefFemale-Persistency-Postpeak2013-ES.pdf
- [25] M.A. Añorve Guillén, "La fiabilidad en la entrevista: La entrevista semi estructurada y estructurada, un recurso de la encuesta", Investigación Bibliotecológica. Archivonomía, bibliotecología e información, vol. 5, n° 10, pp. 29-37, 1991.

- [26] Banco Central de Costa Rica, "Expectativas de inflación a 12 meses", 2022. Accedido: 7 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://gee.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%20761>
- [27] W.F. Sharpe, "Capital Asset Prices: A Theory of Market Equilibrium under Conditions of Risk", The Journal of Finance, vol. 19, n° 3, pp. 425-442, 1964, <https://doi.org/10.2307/2977928>
- [28] R.A. Brealey, S. Myers & F. Allen, "Principios de finanzas corporativas", 13era Ed, México: McGraw-Hill, 2015
- [29] A. Damodaran, "Betas by Sector (US)", enero 2024. Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html
- [30] N. Sapag Chain, J.M. Sapag Puelma y R. Sapag Chain, "Preparación y evaluación de proyectos", 6ta Ed, México: McGraw-Hill, 2014
- [31] E. Barrezueta Morán, "Análisis Comparativo de Costos entre la producción y la compra de huevos fértiles en la granja de reproductores 'Lizapa', Municipio de Lizapa, Honduras", Tesis de grado, Universidad Zamorano, Honduras, 1999. Accedido: 14 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/d5938cdd-05ff-4968-b83e-5ed874b5ca6e/content>
- [32] L.E. Rosero Armas, "Estudio de factibilidad para la sustitución del sistema de incubación de huevos de gallina en la empresa Avícola Di Palma, Honduras", Tesis de grado, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, 2021. Accedido: 14 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/3f3c9fb3-69c7-4072-8cd1-acafeb450b99/content>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Agregar un “asistente” de aprendizaje: mejorando la calidad de pseudo-etiquetas para la detección de objetos semi-supervisada

Adding a teaching “assistant”: improving the quality of pseudo-labels for semi-supervised object detection

Fabian Fallas-Moya¹, Amir Sadovnik², Quan Zhou³,
Konstantinos Georgiou⁴, Hairong Qi⁵

Fecha de recepción: 30 de mayo, 2024

Fecha de aprobación: 19 de agosto, 2024

Fallas-Moya, F; Sadovnik, A; Zhou, Q; Georgiou, K; Qi, H.
Agregar un “asistente” de aprendizaje: mejorando la calidad, de pseudo-etiquetas para la detección de objetos semi-supervisada. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 100-111.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7166>

1 Universidad de Costa Rica

 fabian.fallasmoya@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-0997-2917>

2 Oak Ridge National Laboratory, Estados Unidos

 sadovnika@ornl.gov

 <https://orcid.org/0000-0003-0997-2917>

3 The University of Tennessee, Estados Unidos

 qzhou10@vols.utk.edu

4 The University of Tennessee, Estados Unidos

 kgeorgio@utk.edu

5 The University of Tennessee, Estados Unidos

 hqi@utk.edu

Keywords

Machine learning; semi-supervised learning; artificial intelligence.

Abstract

This paper focuses on semi-supervised object detection (SS-OD) for its tolerance to small amounts of training samples, which is common in real-world applications. Pseudo-label-based approaches have been the mainstream for SS-OD. In this paper, we first show the impact of accurate pseudo-labeling and the challenge of producing such labels. In contrast to prior research that predominantly focused on refining the main model to enhance localization, this paper introduces a novel strategy, where a standalone “Teaching Assistant” or simply “Assistant” is involved in the popular Teacher/Student paradigm to improve the quality of pseudo-labels. This “Assistant” can be plugged into any existing Teacher/Student-based framework without having to fine-tune the original Teacher/Student model. We exploit two “Assistant” models, both of which center around the non-maximum suppression (NMS) method -- a popular technique used to select only the promising bounding boxes. The first “Assistant” model is referred to as the “pre-NMS” assistant that refines the candidate bounding box scores for a better set of inputs to the NMS process. The second “Assistant” model is referred to as the “post-NMS” assistant which takes advantage of SOTA segmentation models to improve the output from the NMS process. We thoroughly evaluate the performance of pre-NMS vs. post-NMS and the impact of improved pseudo-labels on the OD performance. Experimental results on the COCO dataset demonstrate that post-NMS is better than SOTA methods.

Palabras clave

Aprendizaje máquina; aprendizaje semi supervisado; inteligencia artificial.

Resumen

Este artículo se centra en la detección de objetos semisupervisada (SS-OD) por su tolerancia a pequeñas cantidades de muestras de entrenamiento, lo cual es común en aplicaciones del mundo real. Los enfoques basados en pseudoetiquetas han sido la corriente principal para SS-OD. En este artículo, primero mostramos el impacto del pseudoetiquetado y el desafío de producir dichas etiquetas. En contraste con investigaciones anteriores que se centraron en perfeccionar el modelo principal para mejorar la localización, este artículo presenta una estrategia novedosa, en la que un “Asistente de Profesor” independiente o simplemente un “Asistente” participa en el popular paradigma Profesor/Estudiante para mejorar la calidad de la enseñanza. pseudoetiquetas. Este “Asistente” se puede conectar a cualquier marco existente basado en Profesor/Estudiante sin tener que ajustar el modelo original de Profesor/Estudiante. Explotamos dos modelos “Asistentes”, los cuales se centran en el método de supresión no máxima (NMS), una técnica popular utilizada para seleccionar solo los cuadros delimitadores prometedores. El primer modelo “Asistente” se denomina asistente “pre-NMS” y refina las puntuaciones del cuadro delimitador candidato para obtener un mejor conjunto de entradas al proceso NMS. El segundo modelo “Asistente” se conoce como asistente “post-NMS” y aprovecha los modelos de segmentación SOTA para mejorar el resultado del proceso NMS. Evaluamos minuciosamente el rendimiento de pre-NMS frente a post-NMS y el impacto de las pseudoetiquetas mejoradas en el rendimiento de detección de objetos. Los resultados experimentales en el conjunto de datos COCO demuestran que el asistente post-NMS es mejor en comparación con los métodos SOTA.

Introduction

Object detection (OD) has been one of the fundamental problems that a robot has to solve before it can set out to explore the world. SOTA OD models are all deep learning-based. Although deep learning has made a revolution in performance in recent years [1], this advancement comes at a notable cost: the hunger for substantial quantities of labeled data for training. The process of obtaining these labeled data is often characterized by its expense in terms of time and availability [2].

In response, the paradigm of semi-supervised (SS) learning has emerged, advocating for the utilization of a small quantity of labeled data in combination with a large number of unlabeled samples. Recent outcomes in this direction have displayed remarkable results [3] [4] [5] in classification tasks. Pseudo-labeling [6] [7] is the widely used SS method, which basically uses the main model to make predictions over the unlabeled data, and these new predictions or pseudo-labels are then used in subsequent training.

The successes of SS for classification have motivated the development of SS models to solve object detection (OD), referred to as SS-OD. However, the nature of OD brings new challenges to SS. This is mainly due to the heavy reliance of SS on the accuracy of pseudo-labels [6]. SS assumes that the pseudo-labels are close in the feature space (smoothness assumption [8]). In OD, it has to predict both the bounding boxes' location and their classes.

One of the most popularly used SS learning models is the teacher/student (TS) model (similar to distillation learning [9] [10] [11]), where the teacher generates pseudo-labels for the student during training. It is interesting to note that in real-life scenarios, in addition to the teacher and students, there is often another important character for each class, the “teaching assistant”, who helps explain the teacher’s lectures and assignments in a better way such that the students could digest the content better, yielding better learning outcome. Inspired by this analogy, we propose the addition of an “Assistant” model to help improve the quality of the pseudo-labels produced by the teacher model (see Fig. 1).

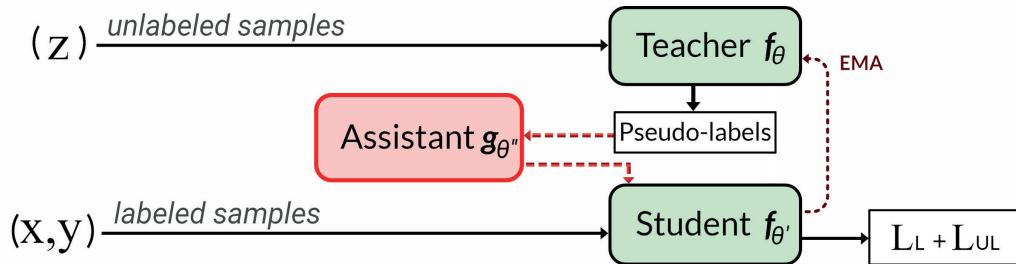


Figura 1. We process the pseudo-labels using an assistant to improve their quality.

Usually, OD generates multiple predictions (or bounding boxes) over the same object, and the non-maximum suppression (NMS) method is often applied to keep only a single box from a set of overlapping predictions (Fig. 2a). However, NMS is based on classification scores, which become unreliable with limited labeled data. To address this issue, we use the assistant model to enhance the classification scores, allowing for more informed decisions. We call this assistant “pre-NMS”. It refines candidate scores that represent a higher intersection over union (IoU) with the object (see Fig. 2b).

Our second assistant, “post-NMS”, works by correcting the pseudo-labels after NMS. We take advantage of recent advances in image segmentation and use the Segment Anything Model (SAM) [12] to perform this correction (see Fig. 2c). SAM is a visual foundation model (VFM)

[13] that attempts to segment the visual content from an image using visual prompts (e.g., dense points, single points, or boxes) without training. This zero-shot inference is possible because SAM was trained using 11M images that contain nearly 1B masks. There are two main challenges when using SAM: first, it needs visual prompts from the user; second, how to use the segments for the task of bounding box correction. To respond to these challenges, in the “post-NMS” assistant model, we first use a novel approach to create a visual prompt with the teacher’s pseudo-label coordinates. This will create masks from the area inside the pseudo-label and we choose the mask that has the largest area as the prompt. The pseudo-label is then adjusted with the most likely object that is contained.

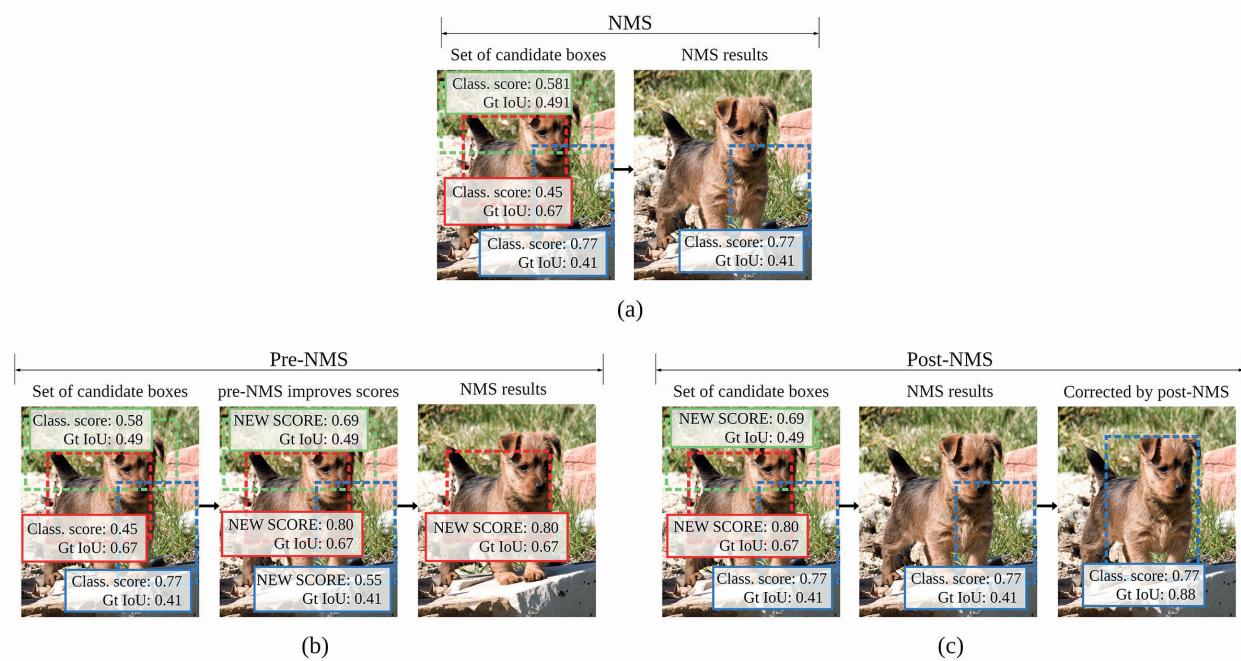


Figura 2. How our two assistants improve the quality of the pseudo-labels around NMS.

Our primary contributions can be summarized as follows.

- Inspired by the important roles that teaching assistants play in a classroom; we expand the TS-SS learning by adding an “assistant” to improve performance.
- We exploit two assistants centered around the NMS that yield improved results.
- We propose to use SAM in the SS-OD pipeline to take advantage of SOTA segmentation model for the purpose of bounding box correction.
- Finally, we thoroughly evaluate the two different assistant models for the purpose of SS-OD and conclude with a superior performance of the post-NMS assistant.

Literature review

The majority of recent semi-supervised classification research adopts the teacher/student framework [9] [10]. SS learning approaches can be further divided into three categories, consistency regularization-based, pseudo-label-based, and hybrid. Consistency regularization [14] [15] assumes that random transformations should not change the predictions given the same input. Pseudo-labeling trains a preliminary model using limited labeled data and then uses this model to assign labels to unlabeled samples. These pseudo-labels are then included in the next-round training. From its first appearance as entropy minimization approach [16] and in deep learning [6], pseudo-labeling has achieved promising performance, including the Meta Pseudo-labels [7], and other hybrid models [4].

Interesting attempts were proposed by Hoffman et al. [17] and Gao et al. [18], where they train using few or no annotated samples. Jeong et al. [19] used consistency regularization to overcome the imbalance of foreground and background. Sohn et al. [20] created a simple framework using pseudo-labeling. Recently, the trend has combined the teacher/student models with exponential moving average (EMA) [10] [21].

Large Language Models (LLMs) have emerged for NLP tasks. Foundation models, pre-trained LLMs on extensive data, enable direct use in downstream tasks without training. SAM [24], a VFM, seamlessly integrates into visual tasks including medical imaging [22], one-shot OD [23], zero-shot segmentation [24], and more [25].

Method

In SS-OD, modern approaches usually build on FixMatch's core concepts [3]: enforcing model consistency through EMA updates between teacher and student models and generating pseudo-labels from the teacher's predictions. Our baseline model, Unbiased Teacher [10], is a recent variant of FixMatch. In the following, before elaborating on the proposed "Assistants", we discuss the importance of having high-quality pseudo-labels.

The pre-NMS Assistant

The pre-NMS assistant model aims to measure pseudo-label quality by constructing a model that, when given an image with predicted bounding boxes from the teacher model, predicts a new objectness score. This score signifies the degree to which the object is present.

IoU-Augment. To train the pre-NMS assistant, we generate image crops with varied IoU based on the ground truth given using labeled data (Fig. 3a). From each image's bounding boxes, we select random points as centroids. New samples, with dimensions scaled proportionally (between 20% and 100%) of the original box, are thus created. This process produces multiple random boxes from a single box, forming new data samples along with their corresponding labels denoting the intersection percentage. We refer to this step as IoU augmentation.

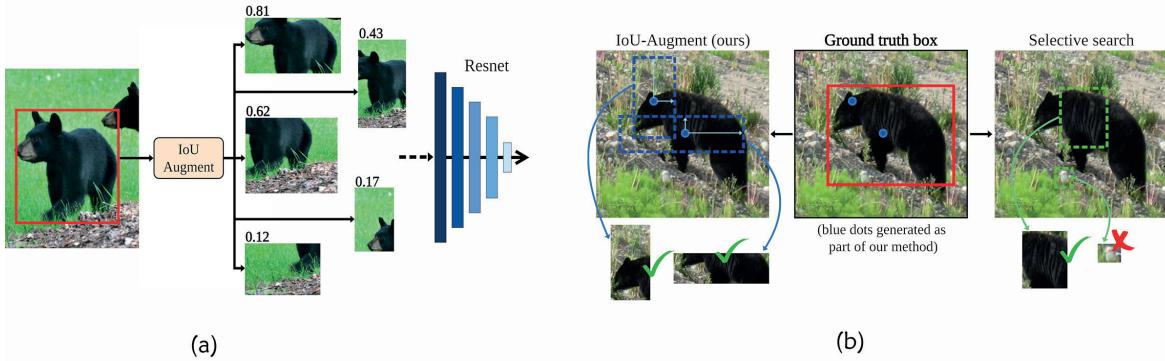


Figura 3. (a) Pre-NMS assistant training process. (b) Our method vs selective search.

Comparison with selective search. An alternative method for generating random samples is selective search [26]. However, it comes with two key limitations. Firstly, selective search can yield samples with irrelevant image sections, as depicted in Fig. 3b-right where a plant is chosen instead of the intended bear. In contrast, our IoU-Augment method guarantees the object's presence within a specific bounding box percentage, ensuring relevance. Secondly, selective search lacks control over sample and label distribution, potentially leading to dataset imbalance (e.g., creating more samples with an $\text{IoU} < 50\%$). In comparison, our method manages the number of samples in different IoU ranges, promoting diverse data.

Implementation details. Resnet-50 is used as the backbone for pre-NMS. The training set is first augmented using the IoU-Augment method, with the mean absolute error (MAE) as the loss function. To address overfitting that arises from generating numerous samples from the same image distribution, we use strong data augmentation strategies. The model convergence is fast, typically within 10,000 iterations.

The post-NMS Assistant

The post-NMS assistant model incorporates SAM to distill information about the object's location (see Fig. 4) using the NMS prediction result directly. SAM is intended for segmentation tasks rather than OD and does not undergo training in this context. Initial attempts [22] [25] [27] reveal that while SAM is powerful, it requires fine-tuning or tailored visual prompting for effective domain adaptation. Fine-tuning is relevant mainly for considerably different domains like medical [22], multi-spectral [28], or 3D objects [27].

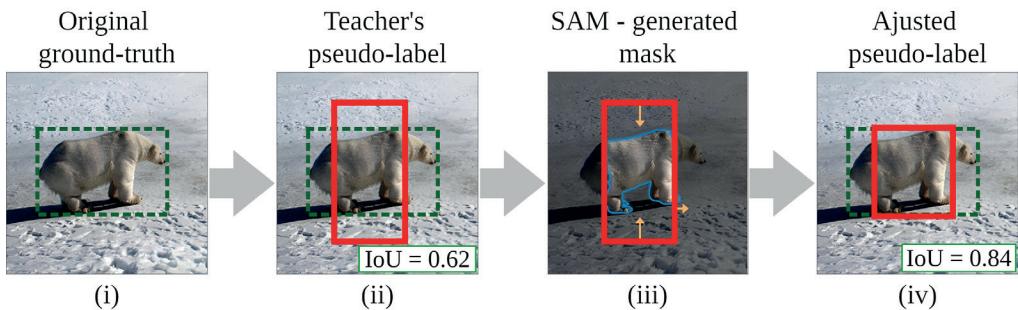


Figura 4. Post-NMS assistant uses the pseudo-labels as visual prompts to feed SAM.

SAM offers two options for visual prompting: user-defined prompts, where users mark points or boxes on images (similar to active learning [1]), and dense sampling through point grids. However, dense sampling is not well suited for SS-OD. Rather than relying on user-generated prompts, we utilize the pseudo-label created by the teacher model as the visual prompt that will be used for SAM. This generates segmentation just inside the pseudo-label. From all the resulting segments we keep the one with the largest area and recover the coordinates of the box that the segment generates. This would be the correction applied to the pseudo-labels. See Fig. 4 for an illustration of this process.

Our pipeline

Fig. 5 shows the main components of our pipeline and how these components interact.

- Burn-in stage: for pre-NMS, during the burn-in stage, we train with labeled data to obtain pre-trained weights for the semi-supervised framework [10] [20]. These weights initialize both the student and the teacher models.
- Mutual learning: our assistants cooperate with the teacher model during pseudo-label generation. The teacher, a Faster R-CNN model, employs the ROI head for which NMS relies on potentially inaccurate classification scores, particularly in initial iterations. Mutual learning integrates our assistants with the teacher and student. It is worth revisiting that pre-NMS enhances NMS decisions through new (more accurate) scores, while post-NMS refines pseudo-labels.

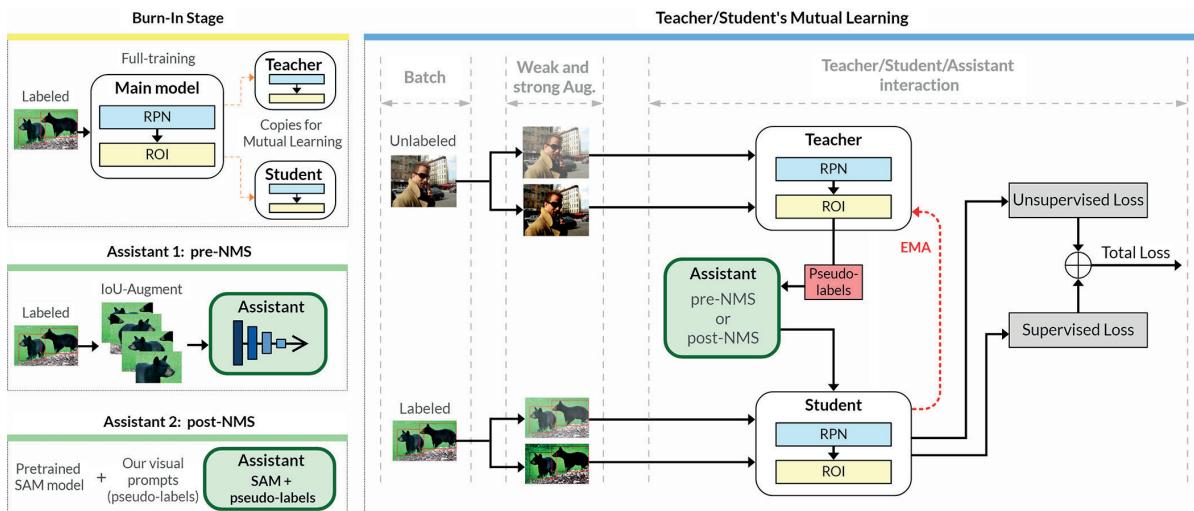


Figura 5. Our main pipeline showcasing how our assistants interact with the main model.

Fig. 5 also shows that the student model is updated using a compound loss for the labeled and unlabeled data, given by $D_L = \{x_i^l, y_i^l\}_{i=1}^{N_l}$ and $D_{UL} = \{x_i^u\}_{i=1}^{N_u}$, respectively. Since we are using Faster R-CNN [18], the labeled data have four losses:

$$\mathcal{L}_L = \sum_i \mathcal{L}_{cls}^{rpn}(x_i^l, y_i^l) + \mathcal{L}_{reg}^{rpn}(x_i^l, y_i^l) + \mathcal{L}_{cls}^{roi}(x_i^l, y_i^l) + \mathcal{L}_{reg}^{roi}(x_i^l, y_i^l)$$

where *rpn* stands for the region proposal network (RPN) model, *roi* for the region of interest (ROI), *cls* for the classification, and *reg* for the regression boxes. Also, we have the unlabeled loss defined by:

$$\mathcal{L}_{UL} = \sum \mathcal{L}_{cls}^{rpn}(x_i^u, \hat{y}_i^u) + 0 \times \mathcal{L}_{reg}^{rpn}(x_i^u, \hat{y}_i^u)$$

where \hat{y} stands for the pseudo-label. Notice that we do not use the ROI loss, disabled by being multiplied by zero (following [10]), because we know the location of the pseudo-labels have inaccuracies, and even though these inaccuracies are lowered by the assistants, the corrections made by them are not integrated into the graph of the derivations and cannot contribute to the loss function. In the end, we have a total loss:

$$L_{total} = L_L + L_{UL}$$

Finally, the teacher model is updated (in every iteration) using EMA [15] with $\theta_{teacher} = \alpha \times \theta_{teacher} + (1 - \alpha) \times \theta_{student}$, where α is the smoothing factor that we set to $\alpha = 0.9996$ following [10] which has shown the best performance.

Experiments

Datasets. We evaluate our framework using the COCO dataset under various conditions: (1) Single class: focusing on one COCO class, (2) 10-classes: using a subset of 10 classes, and (3) COCO-full: using the entire COCO dataset.

Implementation Details. We use Unbiased Teacher [10] as our baseline. The pre-NMS assistant is trained using MAE and data augmentation with strong augmentation policies (flip, color, and slight rotation).

Metrics. We use both mean average precision (mAP) and mean-IoU (mIoU) measured with ground truth for pseudo-label quality.

The pre-NMS Assistant: Training

Table I illustrates the required labeled samples for effective regressor training. “No overlap” denotes training the assistant with images containing objects absent in the evaluation set. “Overlap” signifies that the train and evaluation sets may share class objects. The column “Labeled samples” shows the number of training samples.

During experiments with various sizes of labeled data sets, we observed that augmenting the size of the labeled data set does not consistently improve performance. Table I demonstrates our attempt to enhance performance by enlarging the labeled dataset; however, we found that the best performance is achieved using only the samples labeled with 240. This outcome arises because our IoU-Augment generates numerous new training samples per image. Despite the small 240 sample count, the effective training sample size is significantly larger, for instance, with an average of 8 objects per COCO image [8], and n=10 augmentations per bounding box, this results in $240 \times 10 \times 8 = 19200$ samples. Moreover, the objective function converges fast, typically around 10K iterations, due to its straightforward single-regression nature, and the focus on objectness within boxes.

Table I. Comparing different numbers (from 120 to 4800) of labeled samples during training.

Train/Eval relation	Labeled samples	Loss (MAE)	
		train	eval
No-overlap	120	0.047	0.105
	240	0.076	0.094
	480	0.102	0.101
	960	0.086	0.102
	1200	0.081	0.103
	2400	0.079	0.105
	4800	0.105	0.101
No-overlap with finetuning	240	0.023	0.095
Overlap	240	0.032	0.102

“No-overlap” outperforms the other settings, suggesting training efficacy with objects distinct from the evaluation set. “No-overlap with fine-tuning” initially trains on nonoverlapping classes and fine-tunes with overlapping class data, yet the gain is marginal. Crucially, this table underscores the assistant’s ability to predict pseudo-label IoU accurately, irrespective of the class of the object, which is an important insight.

Table II. Different post-NMS configurations.

Method	SAM model	Thresh	mAP
Regular	-	0.7	41.01
Aug. method	-	0.7	40.67
Super-pseudo	-	0.7	30.71
Super-pseudo + aug. method	-	0.7	30.83
SAM - NMS	h	0.7	34.75
SAM post-NMS	b	0.7	34.61
	l	0.7	42.13
	h	0.7	55.25
	h	0.5	47.33
	h	0.6	53.62
SAM alone	h	-	31.05

The post-NMS Assistant: How to Use SAM

“Post-NMS” required thorough experimentation to adapt SAM. Table II presents our varied experiments for post-NMS configurations. Identifying the optimal setup posed challenges. Initial data augmentation trials (first 4 rows) without SAM showed negligible impact. Experimenting with the model size of SAM (base, large, huge) highlighted “huge” as the most effective. The column “Thresh” specifies the pseudo-label score threshold, that is, the minimum score a pseudo-label needs to have to be considered valid; 0.7 proved to be the most successful. Notably, SAM alone (last row) cannot accomplish OD autonomously.

The Assistants: pre-NMS vs. post-NMS

Table III presents results for our SS-OD methods, labeled proportions, and datasets. Pre-NMS is trained with labeled data. The table displays the mAP (50:95) achieved during training and mIoU at 50% overlap, indicating mIoU between pseudo-labels and ground truth when pseudo-labels overlap 50% or more. We contrast our approach with the Unbiased Teacher (baseline) and standard supervised training (no semi-supervised step) solely using labeled proportions.

The key finding of the table is that our assistants work better for small datasets. Single-class shows the best mAP results with our assistants. With 10 classes, the improvement is significant with post-NMS, but the contribution of pre-NMS is small. In the case of COCO-full, the improvement is less compared to the previous ones; nonetheless, we still observe that the quality improvement of the pseudo-labels (mIoU) is higher with our assistants.

The noteworthy point is the consistent enhancement of pseudo-label quality, as indicated by mIoU, underscoring the need for pseudo-label fine-tuning in mutual learning. Pre-NMS elevates mIoU by , reflecting its ability to refine pseudo-labels. However, its sole reliance on labeled samples limits further corrections to pseudo-labels. Importantly, pre-NMS operates exclusively with the teacher's NMS, making its impact particularly meaningful due to its minimal intervention in training. Conversely, post-NMS consistently emerges as the strongest performer across experiments, offering compelling evidence for the necessity of corrections to pseudo-labels to enhance results.

Table III. Results with experiments with three different percentages (0.5%, 1%, and 5%) of labeled data using mAP_(50:95) and the mean intersection over union (mIoU) at 50%.

Dataset	Method	0.5%		1%		5%	
		mAP	mIoU	mAP	mIoU	mAP	mIoU
Single-class	Supervised	15.67	-	29.51	-	46.19	-
	Unbiased	20.11(+5.68)	78.1	40.09(+10.51)	79.0	56.48(+10.29)	85.8
	pre-NMS	21.48(+5.81)	82.8	41.01(+11.5)	81.1	57.83(+11.64)	85.3
	post-NMS	31.57(+15.9)	93.7	55.25(+25.74)	92.7	62.13(+15.94)	92.8
10-classes	Supervised	12.78	-	21.52	-	28.4	-
	Unbiased	22.38(+9.61)	74.8	31.27(+9.75)	79.5	41.06(+12.66)	85.2
	pre-NMS	22.15(+9.37)	76.3	31.31(+9.79)	81.8	40.58(+12.18)	84.8
	post-NMS	29.01(+15.86)	91.6	34.77(+13.25)	90.2	41.42(+12.89)	93.05
COCO-full	Supervised	5.42	-	8.05	-	12.53	-
	Unbiased	10.09(+4.67)	68.5	17.74(+9.69)	73.3	21.29(+8.76)	84.1
	pre-NMS	9.14(+3.72)	70.0	18.03(+9.98)	75.3	20.45(+7.92)	82.8
	post-NMS	10.41(+4.99)	88.0	18.53(+10.48)	89.2	22.64(+10.11)	87.7

Conclusions and Discussions

We revealed the challenge of achieving precise localization in pseudo-labels, especially in OD's regression. This is due to the localization accuracy not meeting expectations in SS.

We explored using assistant models to help the teacher in pseudo-label creation, particularly before (pre) and after (post) NMS is performed. Our findings showed significant enhancements in three datasets with minimal labeled data (1%, 0.5%, and 5%).

There is still room for improvement in bridging the gap between SS-OD and fully supervised methods. Our current assistant models enhance pseudo-label quality, but to excel on the COCO-full dataset with more classes, a more robust approach is needed.

Referencias

- [1] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, May 2015, number:7553 Publisher: Nature Publishing Group. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/nature14539>
- [2] J. E. Van Engelen and H. H. Hoos, "A survey on semi-supervised learning," *Machine learning*, vol. 109, no. 2, pp. 373–440, 2020.
- [3] K. Sohn, D. Berthelot, N. Carlini, Z. Zhang, H. Zhang, C. A. Raffel, E. D. Cubuk, A. Kurakin, and C.-L. Li, "FixMatch: Simplifying Semi-Supervised Learning with Consistency and Confidence," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33. Curran Associates, Inc., 2020, pp. 596–608.
- [4] A. Kurakin, C. Raffel, D. Berthelot, E. D. Cubuk, H. Zhang, K. Sohn, and N. Carlini, "Remixmatch: Semi-supervised learning with distribution matching and augmentation anchoring," in *ICLR*, 2020. [Online]. Available: <https://openreview.net/pdf?id=HklkeR4KPB>
- [5] S. Laine and T. Aila, "Temporal Ensembling for Semi-Supervised Learning," July 2022. [Online]. Available: <https://openreview.net/forum?id=BJ6oOfqge>
- [6] D.-h. Lee, "Pseudo-Label: The Simple Semi-Supervised Learning Method for Deep Neural Networks," in *International Conference on Machine Learning (ICML)*. ACM, Aug. 2013.
- [7] H. Pham, Z. Dai, Q. Xie, and Q. V. Le, "Meta pseudo labels," in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2021, pp. 11 557–11
- [8] O. Chapelle, B. Sch ölkopf, and A. Zien, Eds., *Semi-supervised learning*, ser. Adaptive computation and machine learning. Cambridge, Mass: MIT Press, 2006.
- [9] L. Wang and K.-J. Yoon, "Knowledge distillation and student-teacher learning for visual intelligence: A review and new outlooks," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 44, no. 6, pp. 3048–3068, 2022.
- [10] Y.-C. Liu, and C.-Y. Ma, "Unbiased teacher for semi-supervised object detection," in *International Conference on Learning Representations*, 2021.
- [11] H. Li, Z. Wu, A. Shrivastava, and L. S. Davis, "Rethinking Pseudo Labels for Semi-supervised Object Detection," *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, vol. 36, no. 2, pp. 1314–1322, June 2022, number: 2.
- [12] A. Kirillov, E. Mintun, N. Ravi, H. Mao, C. Rolland, L. Gustafson, T. Xiao, S. Whitehead, A. C. Berg, W.-Y. Lo, P. Doll ár, and R. Girshick, "Segment Anything," Apr. 2023, arXiv:2304.02643 [cs]. Available: <http://arxiv.org/abs/2304.02643>
- [13] A. Dosovitskiy, L. Beyer, A. Kolesnikov, D. Weissenborn, X. Zhai, T. Unterthiner, M. Dehghani, M. Minderer, G. Heigold, S. Gelly, J. Uszkoreit, and N. Houlsby, "An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale," June 2021, arXiv:2010.11929 [cs]. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2010.11929>
- [14] P. Bachman, O. Alsharif, and D. Precup, "Learning with Pseudo-Ensembles," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 27. Curran Associates, Inc., 2014.
- [15] A. Tarvainen and H. Valpola, "Mean teachers are better role models: Weight-averaged consistency targets improve semi-supervised deep learning results," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 30. Curran Associates, Inc., 2017.
- [16] Y. Grandvalet and Y. Bengio, "Semi-supervised Learning by Entropy Minimization," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 17. MIT Press, 2004.
- [17] J. Hoffman, S. Guadarrama, E. S. Tzeng, R. Hu, J. Donahue, R. Girshick, T. Darrell, and K. Saenko, "LSDA: Large Scale Detection through Adaptation," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 27. Curran Associates, Inc., 2014.
- [18] J. Gao, J. Wang, S. Dai, L.-J. Li, and R. Nevatia, "Note-rcnn: Noise tolerant ensemble rcnn for semi-supervised object detection," in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, October 2019.
- [19] J. Jeong, S. Lee, J. Kim, and N. Kwak, "Consistency-based Semi-supervised Learning," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 32. Curran Associates, Inc., 2019.

- [20] K. Sohn, Z. Zhang, C.-L. Li, H. Zhang, C.-Y. Lee, and T. Pfister, "A Simple Semi-Supervised Learning Framework for Object Detection," Tech. Rep., May 2020, publication Title: arXiv e-prints ADS Bibcode: 2020arXiv200504757S Type: article. [Online]. Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020arXiv200504757S>
- [21] P. Mi, J. Lin, Y. Zhou, Y. Shen, G. Luo, X. Sun, L. Cao, R. Fu, Q. Xu, and R. Ji, "Active teacher for semi-supervised object detection," in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 2022, pp. 14 482–14 491.
- [22] K. Zhang and D. Liu, "Customized Segment Anything Model for Medical Image Segmentation," Apr. 2023, publication Title: arXiv ADS Bibcode: 2023arXiv230413785Z. [Online]. Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv230413785Z>
- [23] R. Zhang, Z. Jiang, Z. Guo, S. Yan, J. Pan, H. Dong, P. Gao, and H. Li, "Personalize Segment Anything Model," May 2023, publication Title: arXiv e-prints ADS Bibcode: 023arXiv230503048Z. Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv230503048Z>
- [24] S. Roy, T. Wald, G. Koehler, M. R. Rokuss, N. Disch, J. Holzschuh, D. Zimmerer, and K. H. Maier-Hein, "SAM.MD: Zero-shot medical image segmentation capabilities of the Segment Anything Model," Apr. 2023, publication Title: arXiv e-prints ADS Bibcode: 2023arXiv230405396R: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv230405396R>
- [25] W. Ji, J. Li, Q. Bi, T. Liu, W. Li, and L. Cheng, "Segment Anything Is Not Always Perfect: An Investigation of SAM on Different Real-world Applications," Apr. 2023, publication Title: arXiv e-prints ADS Bibcode: 2023arXiv230405750J. [Online]. Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv230405750J>
- [26] J. R. R. Uijlings, K. E. A. van de Sande, T. Gevers, and A. W. M. Smeulders, "Selective Search for Object Recognition," International Journal of Computer Vision, vol. 104, no. 2, pp. 154–171, Sept. 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11263-013-0620-5>
- [27] Y. Huang, X. Yang, L. Liu, H. Zhou, A. Chang, X. Zhou, R. Chen, J. Yu, J. Chen, C. Chen, H. Chi, X. Hu, D.P. Fan, F. Dong, and D. Ni, "Segment Anything Model for Medical Images?" Apr. 2023, publication Title: arXiv e- prints ADS Bibcode: 2023arXiv230414660H. [Online]. Available: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv230414660H>
- [28] J. Dyson, A. Mancini, E. Frontoni, and P. Zingaretti, "Deep Learning for Soil and Crop Segmentation from Remotely Sensed Data," Remote Sensing, vol. 11, no. 16, p. 1859, Jan. 2019, number: 16 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/16/1859>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Predicción de Riesgo Cardiovascular en una Población de Atención Primaria Mediante el uso de Machine learning

Predicting Cardiovascular Risk in a Primary Care Population Using Machine Learning

Fredy Troncoso-Espinosa¹, Juan San Martín-Durán²

Fecha de recepción: 30 de mayo, 2024

Fecha de aprobación: 3 de setiembre, 2024

Troncoso-Espinosa, F; Martín-Durán, J.S. Predicción de Riesgo Cardiovascular en una Población de Atención Primaria Mediante el Uso de Machine Learning. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 112-124.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7167>

¹ Departamento de Ingeniería Industrial. Facultad de Ingeniería. Universidad del Bío Bío. Concepción, Chile.

 ftroncos@ubiobio.cl

 <https://orcid.org/0000-0002-9972-3123>

² Departamento de Ingeniería Industrial. Facultad de Ingeniería. Universidad del Bío Bío. Concepción, Chile.

 juanmiguel.sd18@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0001-0529-4234>

Palabras clave

Medicina preventiva; enfermedades cardiovasculares; machine learning.

Resumen

Las enfermedades cardiovasculares (CVD) representan un desafío global para la salud, siendo la principal causa de mortalidad a nivel mundial en 2023. En esta investigación, se construyen modelos predictivos para estimar el riesgo de un individuo de desarrollar una CVD. La población bajo estudio incluye a los usuarios del Centro de Salud Familiar Portezuelo (CESFAM) a través del programa crónico y preventivo 2023. Se emplearon cuatro modelos predictivos: Árbol de Decisión, Red Neuronal, Máquina de Soporte Vectorial (SVM) y Naive Bayes. El algoritmo de SVM destacó por su rendimiento, superando el 85% en las métricas evaluadas. Se identificaron atributos de alta importancia, categorizados como factores conductuales y metabólicos modificables, y se determinó un valor de umbral óptimo de 0.45 para distinguir entre pacientes propensos y no propensos a desarrollar una CVD. Estos hallazgos permiten trazar un plan preventivo para reducir la tasa de CVD en la población estudiada. En conclusión, el modelo predictivo demuestra ser una herramienta complementaria eficaz para la toma de decisiones clínicas.

Keywords

Preventive medicine; cardiovascular diseases; machine learning.

Abstract

Cardiovascular diseases (CVDs) represent a global health challenge, being the leading cause of mortality worldwide in 2023. This study constructs predictive models to estimate an individual's risk of developing CVD. The study population comprises users of the Centro de Salud Familiar Portezuelo (CESFAM) through the 2023 chronic and preventive program. Four predictive models were employed: Decision Tree, Neural Network, Support Vector Machine (SVM), and Naive Bayes. The SVM algorithm demonstrated superior performance, achieving over 85% in the evaluated metrics. High-importance attributes were identified, categorized as modifiable behavioral and metabolic factors, with an optimal threshold value of 0.45 to distinguish between patients likely and unlikely to develop CVD. These findings enable the development of a preventive plan to reduce the CVD rate in the study population. In conclusion, the predictive model proves to be an effective complementary tool for clinical decision-making.

Introducción

Las enfermedades cardiovasculares (CVD, por sus siglas en inglés) representan uno de los principales desafíos para la salud en este siglo [1]. Los costos humanos y económicos, referentes a procedimientos quirúrgicos, monitoreo constante, hospitalizaciones, rehabilitación y saturación del sistema son altamente significativos [2]. Por tanto, la estrategia de combate prioritaria debe ser su prevención en lugar de su tratamiento. Bajo lo indicado por la Federación Mundial del Corazón, las CVD se posicionan como la principal causa de mortalidad a nivel mundial, con una estimación de 17.9 millones de vidas cada año [3]. En el país de estudio, Chile no escapa de esta realidad, siendo que el 23.13% de los fallecimientos del año 2022 fueron a causa de una CVD. El problema se agrava debido a la falta de detección temprana producto de una escasa conciencia y conocimiento en la población sobre los perjuicios de esta enfermedad [4], [5].

Uno de los enfoques actuales de prevención corresponde al uso de machine learning. Desde la evaluación clínica hasta el diagnóstico y tratamiento, este enfoque permite fortalecer la precisión diagnóstica; mejorando la interpretación de datos y demostrando su validez como herramienta complementaria a la estadística tradicional [6].

Dentro de esta área, Campo et al. [7] propone un estudio que utiliza diferentes técnicas y enfoques bajo un mismo entorno de prueba, los resultados de su estudio concluyen que Naïve Bayes logra un mejor desempeño predictivo. Otro estudio, Bharti et al. [8] aplica diferentes algoritmos a un mismo conjunto de datos con motivo de predecir enfermedades cardíacas: Regresión Logística (LR), KNeighbors (KNN), SVM, Random Forest (RF), Decision Tree (DT), y XGBoost, además incluye un modelo de red neuronal con aprendizaje profundo, la investigación concluye que, el enfoque de aprendizaje profundo con capas densas proporciona resultados más eficaces.

Gupta et al. [9] propone un marco de inteligencia computacional para la predicción de enfermedades cardíacas, que utiliza el análisis factorial de datos mixtos para extraer y derivar características del conjunto de datos de enfermedades cardíacas de Cleveland de UCI. El estudio presenta la implementación de diversos modelos de aprendizaje automático, incluyendo LR, SVM, kNN, DT y RF. Los resultados indican que el modelo RF destaca como el mejor algoritmo.

En definitiva, múltiples investigaciones presentan diferentes enfoques en el uso del aprendizaje automático para la detección oportuna de CVD. Entre los métodos más efectivos se encuentra: Árbol de Decisión (DT), Máquina de Soporte Vectorial (SVM), Redes Neuronales (NA), Naïve Bayes, entre otros [10].

Diversos estudios resaltan la importancia del preprocesamiento de datos para mejorar el desempeño predictivo de los algoritmos. Bharti et al. [8] aborda este proceso desde diferentes enfoques, explorando tres perspectivas: el uso de datos sin procesar, la depuración de datos sin valores atípicos y, finalmente, una depuración de outliers y estandarización de datos, concluyendo que, un tratamiento correcto de datos considerando eliminación de outliers, imputación de valores acorde a la distribución de la variable y un exhaustivo análisis exploratorio de los datos conlleva a una mejora el desempeño predictivo de los algoritmos.

Los atributos con mayor relevancia en la predicción de CVD suelen estar clasificados en diversos factores de riesgos; tales como conductuales modificables: fumador, actividad física, consumo de alcohol, tipo de dieta; factores de riesgos metabólicos como: frecuencia cardiaca, fluctuaciones lipídicas, niveles de colesterol, presión arterial y glicemia; e incluso factores sociales como: la clase socioeconómica del individuo y el nivel educacional [11].

Múltiples investigaciones coinciden en que la eficacia en el desarrollo y aplicación de los modelos predictivos mejoraría si es que hubiese un mejor nexo en el trabajo entre equipo de salud y desarrollador del modelo. Sin embargo, la aceptación de estos métodos aún se ve obstaculizada por la falta de algoritmos adecuados, la falta de formación médica en algoritmos predictivos, la preocupación por la sobre mecanización y el temor a perder el "toque humano" [6], [12].

El presente estudio busca diseñar un modelo de predicción de riesgo de enfermedades cardiovasculares (CVD) que detecte de manera oportuna si un individuo sufrirá una enfermedad cardiovascular o no. El estudio está aplicado bajo el registro de controles de salud 2023 de pacientes del Centro de Salud Familiar (CESFAM) Portezuelo, registro que almacena medidas antropométricas, perfil bioquímico y estilo de vida de los pacientes. Con ello se busca determinar y clasificar los atributos de los pacientes asociados con una mayor probabilidad de sufrir una CVD.

Metodología

El presente estudio consistió en la estimación de la predicción de CVD para pacientes del programa crónico y prevención cardiovascular año 2023 del Centro de Salud Familiar, Portezuelo, Región de Ñuble, Chile. Dicho conjunto de datos alberga alrededor de 3200 registros de información de los pacientes referentes a sus medidas antropométricas, perfil bioquímico, estilo de vida e historial clínico referente a enfermedades relacionadas a CVD.

Con motivo de preprocessar el conjunto de datos se realizó el proceso de Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos (KDD), método que consta de 5 partes iterativas y cíclicas [13].

En la primera fase de selección, se extrae el conjunto de datos total o una muestra que sea representativa del estudio, se recopilan las variables de interés desde diversas fuentes buscando obtener la mayor cantidad de atributos que sean de relevancia.

En la segunda fase de preprocessamiento de datos, se elimina todo tipo de ruido que pudiese empeorar el desempeño predictivo. La limpieza y preprocessamiento de datos se realiza a través de técnicas de estadísticas como: eliminación de datos faltantes, outliers, normalización de datos, entre otras.

En la tercera fase de transformación de datos, se aplican técnicas como la ingeniería de características y la codificación de variables categóricas para preparar los datos para el entrenamiento de los modelos de machine learning seleccionados. Estas transformaciones son esenciales para garantizar que los modelos puedan aprender de manera efectiva.

En la cuarta fase de minería de datos, se implementan los modelos de machine learning, estos algoritmos son seleccionados en conformidad con su aplicación relevante en el campo de la medicina preventiva.

Los modelos predictivos utilizados en el presente son:

- Red Neuronal: Modelo basado en la estructura y comportamiento de las neuronas del cerebro y la comunicación que emiten entre ellas a través de impulsos nerviosos, este sistema es expresado de manera teórica como capas y nodos interconectados que aprenden patrones complejos mediante repeticiones de entrenamiento.
- Máquinas de Soporte Vectorial (SVM): Modelo de aprendizaje supervisado que encuentra el mejor hiperplano para separar distintas clases en un espacio multidimensional, utiliza vectores de soporte a fin de maximizar el margen entre ellas.
- Naive Bayes: Modelo probabilístico basado en el teorema de Bayes, realiza el cálculo de probabilidades asumiendo independencia entre los atributos, de esta manera predice la clase de un objeto en particular.
- Árbol de Decisión: Modelo de aprendizaje supervisado que divide el conjunto de datos en nodos basándose en el peso predictivo de sus atributos, en base a ello crea un árbol de decisión. Cada nodo representa una decisión basada en una característica y los nodos, corresponden a las ramas de un nodo superior.

En la quinta fase de interpretación, se evalúa la calidad de los modelos implementados, luego de ello se extrae análisis de valor en base a los objetivos planteados. Dicho análisis es realizado en búsqueda de mejorar la toma decisiones o en su defecto, proveer de retroalimentación al estudio.

Para la evaluación de la calidad de los modelos se utilizan cuatro medidas de desempeño, cada métrica tendrá un mayor peso que otra dependiendo de los objetivos planteados, dichas medidas corresponden a: Accuracy (Exactitud), Precisión, Recall (Exhaustividad) y F1- Score. Las métricas de desempeño son obtenidas a partir de la matriz de confusión (Véase Figura 1).

		Valor Real	
		1	0
Valor Predicho	1	Verdaderos Positivos (VP)	Falsos Positivos (FP)
	0	Falsos Negativos (FN)	Verdaderos Negativos (VN)

Figura 1: Descripción de la matriz de confusión.

La matriz de confusión es una herramienta que resume el rendimiento de un modelo predictivo, clasificado en cuatro segmentos: Verdaderos Positivos (VP), que corresponde aquellas predicciones correctas de las clases positivas; Verdaderos Negativos (VN), que corresponde a aquellas predicciones correctas de la clase negativa; Falsos Positivos (FP), que corresponde a aquellas predicciones incorrectas de la clase positiva; y por ultimo los Falsos Negativos (FN) que corresponde a aquellas predicciones incorrectas de la clase negativa. La composición de esa matriz permite evaluar la precisión y el rendimiento general del modelo en términos de clasificación.

Las medidas de desempeño a utilizar se describen tal que:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{\text{Total de observaciones}} \quad (1)$$

Accuracy: Es el porcentaje de veces que el modelo predice correctamente.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

Precision: Es el porcentaje de veces que se predice correctamente en relación con el porcentaje de veces que se predijo positivamente.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

Recall: Es el porcentaje de veces que se predice de manera correcta en relación con el total de veces en el que el resultado real fue positivo.

$$F1 - Score = \frac{2*Precision*Recall}{Precision+Recall} \quad (4)$$

F1-Score: Medida que combina la precisión y Recall calculando una media armónica de ambas.

Materiales y Métodos

Diseño del Estudio

El estudio corresponde a un tipo observacional retrospectivo cuantitativo, en el que, mediante información previa permite anticipar una CVD en los pacientes en estudio. La población de estudio comprende el control anual de pacientes de atención primaria año 2023 en Cesfam de Portezuelo, dichos pacientes son asistidos en los programas de prevención y tratamiento crónico cardiovascular. En relación con la recopilación de datos, dicha información comprende desde datos de controles médicos protocolares, resultados de pruebas diagnósticas y encuestas de prevención relacionadas al estilo de vida conductual de los pacientes, además de antecedentes familiares relacionados al CVD. La variable predictora, está calculada en base al índice de Framingham, y con ello, se estima el riesgo a desarrollar una CVD [14].

Procedimientos

Se detallan los procedimientos aplicados en cada una de las fases del enfoque KDD para la presente investigación.

- Selección de Variables:** El conjunto de datos es la unificación del conjunto de base de datos de los programas crónico cardiovascular y de prevención del control anual de pacientes año 2023. En el Cuadro 1, se puede visualizar tanto el atributo como una breve descripción del mismo.

Cuadro 1. Variables consideradas para estimar el riesgo a sufrir una CVD

Variables	Descripción
Edad	Edad en años del paciente.
Sexo	Condición biológica del paciente (hombre, mujer, no informa)
Fecha control médico	Fecha del control médico del paciente.
Peso	Medida en kilogramos del paciente.
Talla	Estatura de la paciente dada en centímetros.
IMC	Índice que evalúa la relación peso-altura en la salud.
Estado Nutricional	Categoría Nutricional del Paciente (Bajo peso, Peso normal, Sobre peso, Obesidad.)
Presión Arterial	Fuerza de la sangre contra las paredes arteriales, categorizada en presión diastólica y sistólica.
Glicemia	Nivel de glucosa en la sangre.
Creatinina	Producto de desecho muscular filtrado por los riñones.
Colesterol (Total, HDL y LDL)	Niveles de lipoproteínas en la sangre.
Triglicéridos	Grasas en sangre, almacenadas en tejido adiposo o utilizadas como fuente de energía.
Sodio	Elemento que regula balance hídrico y presión sanguínea.
Potasio	Elemento que controla actividad muscular y ritmo cardiaco.
Cloro	Elemento que mantiene equilibrio de fluidos y PH.
Realiza actividad física	Si realiza actividad física moderada de manera frecuente (2 veces por semana).
Adherencia a Dieta	Si el paciente cuida su alimentación mediante nutricionista
Fumador	Si consume cigarrillos de manera frecuente.

Variables	Descripción
Factores de Riesgo CVD	Factores de riesgo metabólicos para sufrir una CVD (Hipertenso, Diabetes Mellitus Tipo II, Dislipidémico)
Antecedentes cardiovasculares	IAM, AVE, Hipertensión Arterial Refractaria y Aterosteclosis
Riesgo Cardiovascular	Riesgo de sufrir una enfermedad cardiovascular calculado en base al Índice de Framingham.

- b. **Preprocesamiento de Datos:** Se llevaron a cabo un conjunto de técnicas de limpieza de datos a fin de eliminar todo tipo de errores ocasionados por no asistencia de pacientes a sus controles, errores del equipo médico al ingresar los datos, entre otros. Además, se eliminaron aquellos atributos que tuviesen una cantidad elevada de registros nulos (mayor al 40%). A su vez, se eliminaron los datos duplicados y se corrigieron aquellos errores de formato en los datos. Con motivo de eliminar los sesgos de los atributos y robustecer el modelo se aplicó una eliminación de outliers mediante el método de caja de bigotes. Finalmente, aquellos atributos con valores nulos que estuviesen en el rango esperado se les aplicó una imputación de valores mediante método K-Nearest Neighbor (KNN), de esta forma se evitó la perdida de información valiosa.
- c. **Transformación de Datos:** En esta etapa se identificaron y se extrajeron características de interés con las que se pudiese obtener un mejor desempeño predictivo, en primer lugar, se aplicó una matriz de correlación para evaluar la relación entre variables numéricas y tabla de chi-cuadrado para evaluar la significancia entre variables categóricas respecto a la variable predictora. Se crearon nuevas variables a partir del conjunto original, tales como: R.SP (Ratio entre sodio y potasio), medida que tiene cierta relación con la probabilidad de sufrir CVD; índice de aterogenidad (ratio entre colesterol LDL y HDL); cálculo del IfGE. (Índice de filtración glomerular estimado) y variables de acumulación de número de factores de riesgo de CVD y de enfermedades anteriores CVD en el paciente. Posterior a ello, se realizó la estandarización de los datos mediante método MinMaxScaler, de esta forma se asegura la homogeneidad de los datos y una disminución en la probabilidad en el sobreajuste del modelo. Las variables categóricas fueron convertidas a variables numéricas mediante el método de creación de variables dummy. Este proceso fortaleció la calidad de los datos.
- d. **Minería de Datos:** Se llevó a cabo la implementación de 4 modelos predictivos: Árbol de Decisión, Red Neuronal, Support Vector Machine y Naive Bayes. Los algoritmos implementados se llevaron a cabo a través del lenguaje de programación Python. El proceso de entrenamiento, validación y prueba se puede observar mediante figura 2, la subdivisión de la metodología consistió en una división trimestral: los primeros dos trimestres (enero a junio) de 2023 fueron para el conjunto de entrenamiento de los modelos predictivos, el posterior trimestre de 2023, fue destinado para la validación y ajuste de parámetros, en el que, se utilizaron k=5 pliegues para realizar un proceso de validación cruzada y un ajuste de parámetros mediante el método Gridsearch. Una vez teniendo los mejores parámetros para el modelo, se utiliza el último trimestre del año para realizar las predicciones y estimar a los pacientes propensos a sufrir una CVD.

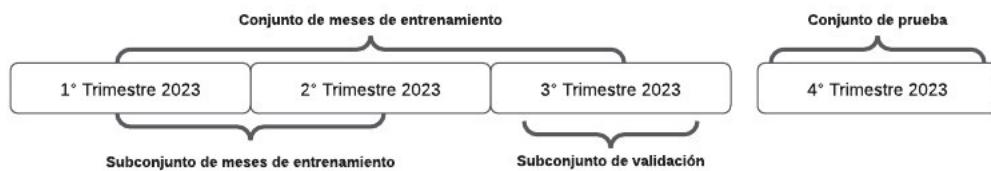


Figura 2: Conjunto de entrenamiento y validación.

e. **Interpretación de Resultados:** Se determinó el mejor modelo mediante de las métricas de desempeño Recall y F1-Score, se consideran estas métricas como prioridad dada la naturaleza del estudio, en la que cometer un error Tipo II es tanto económica y humanitariamente más costoso que cometer un error Tipo I. Posterior a ello, se determinó el umbral óptimo del mejor modelo, lo cual permitió minimizar la combinación de costos asociados a falsos positivos y negativos, revelando así un equilibrio óptimo entre sensibilidad y especificidad para la toma de decisión, donde se prioriza la identificación precisa de pacientes propensos a padecer una CVD.

Resultados

Decisión del mejor Modelo

El cuadro 2 visualiza las métricas de desempeño de los 4 modelos: RN, NB, SVM y TD. SVM es el modelo que mejor rendimiento presenta acorde a los objetivos planteados teniendo los valores de Recall y F1-Score más altos, lo que indica que posee un mejor equilibrio entre la capacidad de prever correctamente aquellos pacientes propensos a sufrir una CVD (precisión) y la capacidad de identificar correctamente todos los casos positivos (recall). Además, se observa que los modelos predictivos poseen un porcentaje de predicción aceptable en virtud de estimar correctamente si un individuo sufrirá una CVD o no, siendo Naive Bayes el único modelo que presenta un porcentaje de exactitud y F1-Score considerablemente menor al resto, siendo inferior al 70%.

Cuadro 2. Métricas de desempeño

Modelo	Exactitud	Precisión	Recall	F1-Score
Red Neuronal	0,86	0,86	0,86	0,86
Naive Bayes	0,67	0,76	0,67	0,67
Support Vector Machine	0,85	0,90	0,86	0,87
Árbol de Decisión	0,79	0,79	0,79	0,79

Por medio de figura 3 se visualizan las Curvas ROC de los 4 Modelos. Si bien SVM es el que posee un mayor valor, los demás modelos predictivos presentan valores superiores a 0.8, por lo que se consideran aceptables y significativos para el estudio, lo que destaca la capacidad de los algoritmos para discriminar entre las clases en estudio (pacientes que sufrirán un infarto respecto a los que no).

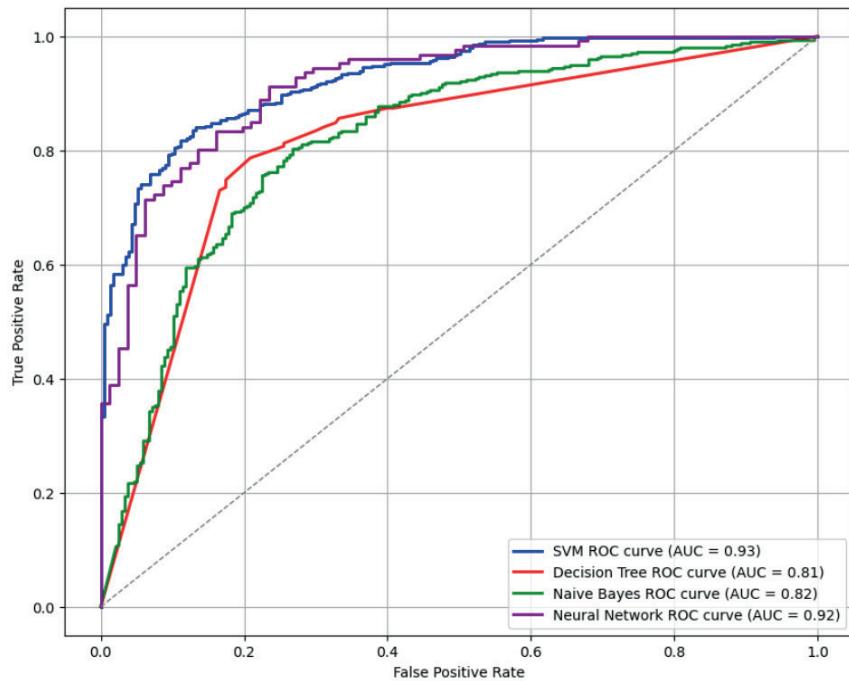


Figura 3: Curva ROC de modelos predictivos

Dada las características del estudio en el que se prioriza el Recall y F1-Score como medidas de desempeño decisivas es que se determina que SVM es el modelo es el más apto para el estudio, es por ello que el análisis posterior está dado en base a la extracción de análisis sobre el mismo.

Importancia de los atributos

La implementación del modelo SVM permite extraer los pesos de las variables (Véase Cuadro 3, de esta forma es posible entender la importancia de cada atributo en la predicción de cada clase (sufrirá una CVD o no). Estos atributos con mayor relevancia dentro del estudio pueden ser clasificados como variables metabólicas modificables, conductuales y antecedentes de enfermedades previas de un paciente.

Los atributos que aumentan la probabilidad de sufrir una enfermedad cardiovascular en el paciente pueden clasificarse en tres categorías principales. En primer lugar, las variables metabólicas modificables incluyen el aumento en los niveles de glicemia, colesterol total, creatinina y el índice de filtración glomerular estimado. En segundo lugar, las variables conductuales modificables comprenden la situación de obesidad, la falta de actividad física y el hábito de fumar. Por último, los antecedentes de enfermedades previas que contribuyen a esta probabilidad son sufrir de diabetes mellitus tipo II, ser hipertenso y tener antecedentes previos de una enfermedad cardiovascular, como un infarto agudo de miocardio o un accidente cerebrovascular.

Los atributos que poseen un mayor peso en la disminución de la probabilidad de padecer una enfermedad cardiovascular incluyen realizar actividad física de manera regular, mantener un peso dentro de los rangos considerados como normales, no padecer de síndrome metabólico y mantener un perfil bioquímico estable, es decir, no exceder los niveles normales de triglicéridos, hemoglobina, presión arterial, entre otros.

Cuadro 3. Características de pacientes con y sin riesgo de sufrir una CVD

Pacientes con riesgo de CVD		Pacientes sin riesgo de CVD	
Atributo	Peso	Atributo	Peso
N_Fact_Riesgo	2.25	Actividad Física = SI	-1.26
N_Hist_CVD	1.42	Estado Nutricional = Peso Normal	-1.05
Estado nutricional = Obesidad	1.41	Síndrome metabólico = NO	-0.81
Actividad física = NO	1.25	Í. Aterogenecidad= Bajo Riesgo	-0.54
Glicemia	1.03	Ratio S/P	-0.40
Síndrome Metabólico = SI	0.82	Fumador = NO	-0.35
Creatinina	0.56	Presión sistólica	-0.17
Í. Aterogenecidad= Riesgo Intermedio	0.54	Colesterol HDL	-0.16
Fumador = SI	0.35	Hemoglucotest	-0.16
Colesterol Total	0.35	Triglicéridos	-0.13
Edad	0.26	Sexo = Mujer	-0.04
IfGe	0.26		
Adherencia Dieta = NO	0.11		
Sexo = Hombre	0.04		

Determinación umbral óptimo

Para un análisis más profundo para la implementación del modelo, se analizan los costos de error de clasificación. Los costes de clasificación son calculados de la siguiente manera:

$$\text{Costo} = \text{TFN} * C(0,1) + \text{TFP} * C(1,0) \quad (5)$$

Donde TFN representa la tasa de falsos negativos; TFP la tasa de falsos positivos; C(0,1) como el costo de cometer un Error de Tipo I y a C(1,0) como el costo de cometer un Error de Tipo II. Dado que TFN=1-TFP, la curva de costos puede ser representada en términos de las dimensiones de la Curva ROC por medio de la siguiente ecuación.

$$TVP = \frac{C(1,0)}{C(0,1)} * TFP + 1 \quad (6)$$

El umbral óptimo se selecciona minimizando la combinación de los costos asociados a los falsos positivos y falsos negativos, esto se logra identificando el punto de intersección entre la curva de costos y la Curva ROC. Este enfoque permite encontrar un equilibrio entre la sensibilidad y la especificidad del modelo, optimizando la toma de decisiones según los costos asociados a los errores de clasificación. Dado el contexto de la investigación los dos tipos de costos son estimados mediante consultoría al equipo médico y finanzas del Cesfam Portezuelo de tal manera que:

- Error Tipo I : Indicar que un paciente sufrirá un infarto cuando no lo sufrirá, por ende, la evaluación económica está dada por el cálculo de asistir a un paciente mediante un programa crónico cardiovascular, teniendo un costo de 575.063 pesos chilenos, en el que se consideran: constantes monitores trimestrales, pago de remuneraciones al

personal (administrativo, kinesiólogo, nutricionista, medico, enfermero, etc), mantención de infraestructuras, servicios básicos y todo de tipo de coste relacionado a un centro de atención cardiovascular.

- Error Tipo II: Indicar que un paciente no sufrirá un infarto cuando lo sufrirá, por ende, la evaluación económica está relacionado a los costos de asistir al paciente tras sufrir una enfermedad coronaria y posteriormente tratarlo en el programa crónico, teniendo un costo total de 1.092.773 pesos chilenos, en el cual se consideran: traslado de paciente, costo día-cama hospitalización y asistencia en un programa CVD.

Tras obtener ambos costes de clasificación se obtiene el umbral óptimo con el que se distinguirá entre clases positivas y negativas. El umbral que minimiza el costo de error de clasificación resulta ser de 0.45. Esto quiere decir que para clasificar un paciente que sufrirá una enfermedad cardiovascular su probabilidad debe ser mayor a este valor.

Esquema de implementación del modelo predictivo

Se muestra el proceso para llevar a cabo la implementación de la investigación en el contexto de los programas preventivos de CVD. Por medio de la Figura 4 se visualizan las diferentes fases de la estrategia, desde la extracción de datos de los pacientes a predecir desde la base de datos, aplicación del modelo de SVM y la clasificación de pacientes entre propensos a sufrir o no una CVD, luego de clasificar a estos pacientes se busca que el equipo médico trabaje con aquellos pacientes con un mayor riesgo acorde a los resultados del modelo.

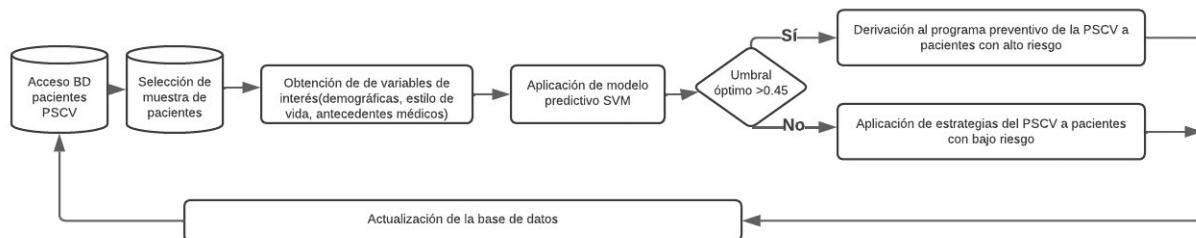


Figura 4: Esquema de implementación modelo predictivo

Discusiones

La detección de enfermedades cardiovasculares mediante el uso de machine learning ha sido un problema ampliamente estudiado por la literatura durante la última década, permitiendo una mejora en la precisión diagnóstica [15]. Los modelos implementados durante la investigación entregan resultados aceptables en función de detectar oportunamente una CVD, con ello es posible afirmar que el uso de algoritmos de aprendizaje son una herramienta eficaz que permite servir como punto inicial para con ella trazar planes de acción y medidas preventivas en aquellos pacientes clasificados como pacientes propensos a sufrir una CVD. Entre los modelos, destaca el desempeño del modelo SVM, lo cual es coincidente con múltiples investigaciones aplicadas a este mismo sector [7], [12], [16].

Respecto al estudio de la contribución de las variables en el modelo predictivo, estas son concordantes con lo hallado en la literatura. En la cual se identifican factores que pueden ser categorizados en factores de riesgos conductuales modificables y factores de riesgo metabólicos y genéticos. El método de extracción de pesos en el modelo SVM entregó una estimación aproximada del grado de contribución de los atributos sobre la probabilidad de

padecer una CVD, de esta forma se afirma que la afección de una enfermedad cardiovascular puede reducir su probabilidad si es que el individuo altera o disminuye sus factores de riesgo metabólicos que contribuyen de manera importante tales como: presión arterial, glicemia, triglicéridos, entre otros mediante el cambio de factores de riesgo conductuales tales como: un aumento en la actividad física y el no consumo de tabaco, entre otros [11].

Se comprueba empíricamente la necesidad de realizar un trabajo estrecho con el equipo médico, existiendo una entrega de conocimiento bidireccional en la que el equipo médico pudiese proveer de información al desarrollador del modelo, generando así una mejora continua sobre el enfoque predictivo, y de manera simultánea, el investigador puede resaltar la importancia de capturar una mayor cantidad de atributos del paciente y la necesidad de evitar inconsistencias en el ingreso de datos del paciente, lo que proporcionará un conjunto de datos más robusto que mejore el desempeño predictivo de los modelos [12].

Conclusiones

La presente investigación aborda el estudio del problema de detección de enfermedades cardiovasculares mediante la implementación de modelos predictivos basados en el conjunto de datos del programa cardiovascular y preventivo 2023 del Centro de Salud Familiar Portezuelo. Dado los resultados obtenidos de los cuatro modelos predictivos: Naive Bayes, Red Neuronal, Support Vector Machine y Árbol de Decisión, en el que todos los modelos se obtiene un porcentaje de precisión superior al 75% es posible afirmar que son una herramienta eficaz para discriminar entre individuos que padecerán de una CVD y los que no.

El modelo de SVM es el modelo que mejor desempeño presenta acorde a los objetivos del estudio planteados, obteniendo en todas sus métricas de desempeño un valor superior al 85% (Precisión, Recall, Exactitud y F1-Score). Además, se obtiene un valor de curva ROC de 0.93 para este modelo. Lo que indica que el modelo es eficaz para predecir correctamente y de ofrecer un equilibrio entre la predicción de las clases.

Por medio del método de obtención de pesos del modelo SVM se identificaron factores de riesgos que aportan una mayor contribución para el modelo predictivo, tales como: glicemia, presión arterial, antecedentes familiares, nivel del colesterol y edad del individuo. La contribución de las demás variables de estudio, aunque fuese menor también se considera relevante para el estudio. Se identifica que existen factores de riesgo conductuales y metabólicos que son categorizados como modificables, por ende, estas variables pueden ser tratadas y alteradas mediante la aplicación de planes de acción preventivos a fin de disminuir la tasa de CVD en la población bajo estudio.

El estudio abordó la determinación de asumir costos de clasificación para los errores de Tipo I y Tipo II, de esta forma se calculó un valor umbral óptimo de 0.45, lo que significó que para que el modelo considere que un paciente sufra una CVD este debe tener una probabilidad superior a la de este umbral. De esta forma se optimiza la toma de decisiones clínicas.

A raíz del presente estudio surgen nuevas consideraciones que pueden ser tomadas como futuras investigaciones, se proponen algunas como: la incorporación de nuevos atributos para el conjunto de datos que considere factores sociales tales como: niveles de estudio y clase socioeconómico del individuo. Como último punto, se propone construir una aplicación web móvil para el equipo médico del Cesfam Portezuelo con el cual sea posible utilizar el modelo predictivo y entregar un resultado de forma automática al ingresar registros de nuevos usuarios.

References

- [1] NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC), «Worldwide trends in hypertension prevalence and progress in treatment and control from 1990 to 2019: a pooled analysis of 1201 population-representative studies with 104 million participants.,» *The Lancet*, vol. 398, pp. 957-980, 2021.
- [2] A. Gheorghe, U. Griffiths, A. Murphy, H. Legido, P. Lamptey y P. Perel, «The economic burden of cardiovascular disease and hypertension in low- and middle-income countries: a systematic review,» *BMC Public Health*, vol. 18, n° 975, 2018.
- [3] Organización Mundial de la Salud, «Organización Mundial de la Salud,» [En línea]. Available: <https://www.who.int/es>. [Último acceso: 05 01 2024].
- [4] Departamento de Estadísticas e Información de Salud, «Departamento de Estadísticas e Información de Salud,» [En línea]. Available: <https://deis.minsal.cl/>. [Último acceso: 01 05 2024].
- [5] P. Varletta, M. Acevedo, G. Valentino, S. Brienza y M. del Sueldo, «Conciencia de Enfermedad Cardiovascular y Conocimiento sobre Factores de Riesgo y Prevención Cardiovascular: Resultados Chilenos de Encuesta SIAC Cono Sur,» *Revista chilena de cardiología*, vol. 41, n° 2, 2022.
- [6] Y. Sethi, N. Patel, N. Kaka, O. Kaiwan, J. Kar, A. Moinuddin, A. Goel, H. Chopra y S. Cavalu, «Precision Medicine and the future of Cardiovascular Diseases: A Clinically Oriented Comprehensive Review,» *Journal of Clinical Medicine*, vol. 12, n° 5, p. 1799, 2023.
- [7] J. Campo, K. Parra, F. Mendoza y A. De La Hoz, «Análisis de técnicas de MD en diagnóstico de enfermedades cardiovasculares,» *EIEI ACOFI*, 2015.
- [8] R. Bharti, A. Khamparia, M. Shabaz, G. Dhiman, S. Pande y P. Singh, «Prediction of Heart Disease Using a Combination of Machine Learning and Deep Learning,» *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021.
- [9] A. Gupta, R. Kumar, H. Singh y B. Raman, «MIFH: A Machine Intelligence Framework for Heart Disease Diagnosis,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14659-14674, 2020.
- [10] E. Sánchez, Y. Hernandez y J. Ortiz, «Breve revisión de la literatura sobre Modelos Predictivos para la Detección de Enfermedades Cardiovasculares,» *Ciencia y Tecnología Aplicada*, vol. 5, n° 1, 2022.
- [11] J. Moon, H. Posada y K. Chon, «A literature embedding model for cardiovascular disease prediction using risk factors, symptoms, and genotype information,» *Expert Systems with Applications*, vol. 213, n° A, p. 118930, 2023.
- [12] O. Chavez, L. Galindo, A. Barriendos y M. Cuadros, «Aplicación Móvil para Predecir la Probabilidad de Pertener al Grupo de Riesgo Cardiovascular Utilizando Machine Learning,» *International Institute of Informatics and Cybernetics*, pp. 158-163, 2022.
- [13] S. Timarán, I. Hernández, S. Caicedo, A. Hidalgo y J. Alvarado, «El proceso de descubrimiento de conocimiento en bases de datos,» de *Descubrimiento de patrones de desempeño académico con árboles de decisión en las competencias genericas de la formación profesional*, Bogotá: Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia, 2016, pp. 63-86.
- [14] C. Andersson, M. Naylor, C. Tsao y R. Vasan, «Framingham Heart Study: JACC Focus Seminar,» *J Am Coll Cardiol*, vol. 77, n° 21, pp. 2680-2692, 2021.
- [15] «Una revisión de la literatura para la detección y proyección de enfermedades cardiovasculares mediante el aprendizaje automático,» *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol. 10, 2024.
- [16] H. Ayatollahi y L. Gholamhosseini, «Predicting coronary artery disease: a comparison between two data mining algorithms,» *BMC Public Health*, vol. 19, n° 448, 2019.
- [17] H. Benhar, A. Idri y J. Fernández, «Data preprocessing for heart disease classification: A systematic literature review,» *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 195, 2020.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Determinación de la presencia del fungicida Clorotalonil en agua potable proveniente de comunidades en Costa Rica mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC)

Determination of the presence of the fungicide Chlorothalonil in drinking water from communities in Costa Rica using High Resolution Liquid Chromatography (HPLC)

Priscilla Rojas-Alvarado¹, Alexandra Chavarría-Chavez², Britany Jiménez-Carmona³

Fecha de recepción: 30 de mayo, 2024

Fecha de aprobación: 17 de agosto, 2024

Rojas-Alvarado, P; Chavarría-Chavez, A; Jiménez-Carmona, B. Determinación de la presencia del fungicida clorotalonil en agua potable proveniente de comunidades en Costa Rica mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC).

Tecnología en Marcha. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025.
Pág. 125-138.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7168>

1 Docente en Universidad de Costa Rica, Grecia, Costa Rica.

 priscilla.rojasalvarado@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5640-3640>

2 Estudiante, Universidad de Costa Rica, Grecia, Costa Rica

 alexandra.chavarriachaves@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0007-2679-2420>

3 Estudiante, Universidad de Costa Rica, Grecia, Costa Rica

 britany.jimenez@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0008-9821-351X>

Palabras Clave

Agua potable; Clorotalonil; plaguicidas; Cromatografía Líquida de Alta Resolución; análisis cualitativo.

Resumen

En este estudio se llevó a cabo un análisis cualitativo para la determinación de la presencia del compuesto clorotalonil; reconocido por sus propiedades fungicidas, en muestras de agua potable provenientes tanto de las ASADAS o acueductos, así como de hogares ubicados en las comunidades de Cipreses, Cirrí, Palmira, Escobal y San Juan de Grecia en Costa Rica. La investigación se centró en evaluar la posible contaminación de este recurso vital por parte de este compuesto químico. Para realizar este análisis, se implementó la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), basada en la metodología establecida por Gallardo (2020), la cual permitió una detección precisa y cualitativa del clorotalonil en las muestras examinadas. Dentro de los resultados obtenidos, se comprobó la presencia de clorotalonil en cuatro de las muestras analizadas. Sin embargo, es crucial destacar que las concentraciones encontradas no fueron lo suficientemente elevadas como para ser cuantificadas de manera precisa, sugiriendo la existencia únicamente de trazas de este compuesto en el agua potable estudiada. A pesar de que estas trazas no alcanzaron niveles cuantificables, es importante recalcar que incluso pequeñas cantidades de clorotalonil pueden tener implicaciones negativas para la salud humana a largo plazo. Por lo tanto, estos hallazgos evidencian la necesidad de una vigilancia continua y medidas preventivas para garantizar la calidad y seguridad del suministro de agua potable en estas comunidades.

Keywords

Portable water; Chlorothalonyl; pesticides; High Resolution Liquid Chromatography; qualitative analysis.

Abstract

In this study, a qualitative analysis was carried out to determine the presence of the compound chlorothalonyl; recognized for its fungicidal properties, in samples of drinking water coming from both the ASADAS or aqueducts as well as from homes located in the communities of Cipreses, Cirrí, Palmira, Escobal and San Juan de Grecia in Costa Rica. The research focused on evaluating the possible contamination of this vital resource by this chemical compound. To carry out this analysis, high-performance liquid chromatography (HPLC) was implemented, based on the methodology established by Gallardo (2020), which allowed precise and qualitative detection of chlorothalonyl in the samples examined. Among the results obtained, the presence of chlorothalonyl was verified in four of the samples analyzed. However, it is crucial to highlight that the concentrations found were not high enough to be precisely quantified, suggesting the existence of only traces of this compound in the drinking water studied. Although these traces did not reach quantifiable levels, it is important to emphasize that even small amounts of chlorothalonyl can have negative implications for human health in the long term. Therefore, these findings evidence the need for continued surveillance and preventive measures to ensure the quality and safety of the drinking water supply in these communities.

Introducción

El suministro y disponibilidad de agua potable es fundamental para asegurar el bienestar y desarrollo humano. El agua es un nutriente esencial para la vida, por lo que contar con acceso a fuentes de agua limpia, segura y consumible permite garantizar a la población las condiciones de vida idóneas y el adecuado funcionamiento de diversas actividades; sin embargo, en muchos de los casos el agua potable no siempre cuenta con las condiciones de calidad adecuadas para el consumo humano, siendo de esta forma una amenaza para la salud [1]. La presencia de contaminantes como bacterias patógenas, compuestos químicos tóxicos, metales pesados o pesticidas en el agua potable puede comprometer la salud. La ingestión de agua contaminada y el saneamiento deficiente contribuyen a la transmisión de enfermedades como el cólera, otras enfermedades diarreicas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea, la poliomielitis y otros padecimientos que comprometen la calidad de vida [2].

La calidad y cantidad de agua potable son factores cruciales para la vida humana, haciendo esencial mantener un control adecuado de su calidad y salubridad para el bienestar humano. En Costa Rica, la contaminación del agua potable está directamente vinculada a la utilización de los recursos naturales y la gestión inadecuada de los desechos relacionados con el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y la actividad humana en general [3]. En el contexto de la agricultura, los plaguicidas son sustancias químicas diseñadas para controlar las plagas, de manera que se pueda garantizar la productividad de los cultivos. Estos productos, los cuales incluyen herbicidas, insecticidas y fungicidas, se utilizan extensamente en la industria agrícola para proteger los cultivos de enfermedades y asegurar la obtención de un producto de calidad [4]. Sin embargo, el uso excesivo y desmedido de plaguicidas ha llevado a un problema creciente y preocupante: la contaminación del agua potable como repercusión directa.

Este problema radica en las diversas maneras de aplicación y clasificación que poseen los agroquímicos como, por ejemplo: según el destino de aplicación, aspersión, acción específica, constitución química o grado de peligrosidad que posean. Por lo cual, estos ocasionan serios problemas que comprometen la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y ecológicos, la biodiversidad y la calidad de vida de los seres vivos; ocasionando enfermedades, como: cáncer, abortos y malformaciones. Además, debido a su uso desmedido se contaminan los suelos y recursos hídricos allegados a las zonas de aplicación [5].

En la actualidad, el aumento en la demanda global y la producción de alimentos a gran escala ha impulsado el uso intensivo de plaguicidas que aseguren la protección de los cultivos. Este exceso conlleva a la acumulación de residuos agroquímicos, los cuales se degradan lentamente, distribuyéndose en el ambiente, y aún en niveles bajos pueden causar daños a la salud humana y la vida silvestre debido a su naturaleza tóxica, cancerígena, mutagénica y teratogénica [6]. Este problema plantea desafíos significativos no sólo para la conservación del medio ambiente sino también para la sostenibilidad agrícola y la preservación de la salud humana.

Este estudio se centra específicamente en el clorotalonil, el cual se clasifica como un fungicida; los fungicidas son sustancias diseñadas para prevenir el crecimiento o eliminar hongos y mohos perjudiciales para los seres vivos [7]. Por otra parte, los fungicidas “no solamente se refiere a un producto que tiene la capacidad de destruir hongos” [8], puesto que incluye a otros compuestos capaces de ser resistentes a la planta huésped o que adicionalmente transforman el medio ambiente en un lugar inadecuado para el desarrollo y crecimiento del organismo infeccioso.

Ahora bien, los fungicidas se mueven dentro de los tejidos de la planta para afectar los procesos biológicos vitales en el ciclo de vida del fitopatógeno, según esta interacción estos pueden agruparse en: Protectantes (contacto) y Sistémicos (localizados o mesostémicos) [9]. Como se menciona previamente, el fungicida de interés para la presente investigación en

aguas potables es el clorotalonil, perteneciente a la familia de los clorofenoles, que se adhieren a grupos sulfhidrilo y mercaptanos y es clasificado como fungicida de contacto de amplio espectro, el cual puede ocasionar diversas afecciones a los mamíferos, incluyendo mutaciones, toxicidad crónica, reacciones alérgicas y potencial carcinogénico al contacto prolongado [10].

El clorotalonil es un compuesto aromático policlorado con actividad fungicida protectora, de aplicación foliar, de acuerdo con [11] se usa en el control de la Sigatoka negra en cultivos de plátano y banano; sin embargo, también se menciona que se puede utilizar en infestaciones bacterianas en diversos cultivos, esto lo respalda el estudio de [12], en el cual se encontró que el tercer plaguicida más utilizado en el cultivo de papas en Pacayas, Cartago, Costa Rica fue el clorotalonil. Ahora bien, es importante mencionar que este fungicida contiene metabolitos que pueden ser tóxicos lo cual hacer que su uso presente efectos adversos en el ambiente [11].

Por tanto, este compuesto se vuelve tóxico para seres vivos en los medios acuáticos, donde al ser un organofosforado presenta una toxicidad aguda [12]. Además, el clorotalonil posee una vida media de 5 a 15 días en suelos inundados y una vida media por fotólisis en superficies de agua de 65 días; presentando baja solubilidad en agua. En humanos, el clorotalonil puede ocasionar irritación (nariz, garganta y pulmones), dermatitis, riesgo de lesión ocular, problemas gastrointestinales y puede considerarse un posible carcinógeno [12] [13]. Por lo cual, su concentración según el Reglamento de la Calidad del Agua no puede sobrepasar los 0,1 µg/L [14].

Para efectos del estudio, se implementará el método de análisis de clorotalonil por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), la cual es una de las técnicas de cromatografía más utilizadas en la determinación de plaguicidas debido a su capacidad de separar analitos de distinta naturaleza presentes en una mezcla y su versatilidad. En el método participan la fase móvil, la fase estacionaria y la muestra de interés [15]. La separación se logra al trasladar la muestra inyectada a través de la fase estacionaria utilizando la fase móvil líquida, donde las fuerzas químicas y físicas actúan en la mezcla y las fases, determinando el tiempo de retención y la separación de cada componente. A medida que la muestra se desplaza en la fase estacionaria, los componentes con mayor afinidad a esta fase se desplazarán más lentamente en comparación con aquellos que muestran menor afinidad por la fase estacionaria. La afinidad de cada sustancia desempeña un papel crucial, ya que influyen directamente en la velocidad y el momento en que cada componente se eluye de la fase [15].

En relación con lo mencionado, el objetivo de este estudio es determinar la presencia del clorotalonil en muestras de agua potable en distintas zonas de Costa Rica por medio de Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC), con la finalidad de establecer la presencia de este fungicida en diferentes áreas de abastecimiento de agua en el país.

Materiales y Métodos

Se toma como referencia el método utilizado por [16], para la determinación de plaguicidas en aguas por medio de técnicas cromatográficas.

Muestreo

Tipo de muestreo: Muestreo puntual o discreto.

Localización del muestreo: Cinco distritos (Escobal de Atenas, Cirrí de Naranjo, Cipreses de Cartago, San Juan de Grecia y Palmira de Zarcero), estas zonas se eligen debido a que se encuentran cercanas a sitios de producción agrícola (Figura 1), se toma una muestra en la

ASADA o en el acueducto y otra muestra en una casa de habitación (al azar) de la comunidad, en la Figura 1 se observan los puntos de las ASADAS o acueductos y se denota con puntos azules para los puntos de recolección en las casas de habitación.

Recolección de la muestra: Se realiza la recolección de 10 muestras de 500 mL de agua potable, dos muestras por cada zona de muestreo, en botellas de vidrio oscuros previamente homogeneizadas.

Preservación de muestra: Las muestras se colocan en una cámara de frío, manteniendo una temperatura promedio inferior a 4°C hasta el momento de su análisis, para esto se utilizaron hieleras desde el punto de muestreo hasta su transportación al laboratorio de ensayo.

Localización de los análisis: Los análisis de las muestras se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química del Recinto de Tacares de la Universidad de Costa Rica.

Instrumento utilizado: Cromatógrafo HPLC marca Thermo Scientific UltiMate 3000 Series.





Figura 1. Disposición geográfica de los puntos de muestreo de aguas potables. (a) Puntos de muestreo en Palmira. (b) Puntos de muestreo en Cirrí. (c) Puntos de muestreo en Cipreses. (d) Puntos de muestreo en Grecia. (e) Puntos de muestreo en Escobal. (f) Puntos de muestreo en Tacares.

Procedimiento para la preparación de la curva de calibración de Clorotalonil

Se prepara una solución madre de Clorotalonil a 1000 mg/L a partir de un estándar sólido y se afora con acetonitrilo grado HPLC.

Se prepara una solución intermedia a 10mg/L a partir de la solución madre de 1000 mg/L.

Se prepara, a partir de la solución intermedia, un estándar, cuya concentración es de 0,1 mg/L.

Condiciones de trabajo para el equipo (HPLC)

Para esta investigación, se utilizó el equipo HPLC marca Thermo Scientific UltiMate 3000 Series, se utiliza fase reversa bajo las siguientes condiciones:

Cuadro 1. Condiciones para el uso del equipo HPLC

Tipo de cromatografía	Fase reversa
Columna	C-18, 250 x 4.6 mm, 5 μ m
Temperatura	Ambiente
Detector	Arreglo de diodos
Longitud de onda	231 nm
Bomba	Cuaternaria
Fase móvil	Acetonitrilo/Agua 70:30
Flujo	1 mL/min
Volumen de inyección	20 μ L
Injecto	Automático

Análisis de las muestras

Se traspasan las muestras a tubos de ensayo graduados y se realiza un lavado del balón con pequeñas cantidades de metanol, los enjuagues se dejan en tubos de ensayo graduados llegando a un volumen no superior a los 7 mL. Los tubos de ensayos se llevan a baño maría a 30°C y se les pasa nitrógeno gaseoso, esto con el fin de evaporar los restos de solvente orgánico. Las muestras se llevan a un volumen aproximado de 2 mL para luego ser trasvasadas a matraces de aforo de 5 mL, se guardan en viales de vidrio y se inyectan en el equipo.

Resultados y discusión

El análisis de clorotalonil en aguas potables provenientes de ASADAS se realizó de manera cualitativa mediante una comparación de los cromatogramas realizados con los picos presentados en las muestras, donde un análisis cualitativo como [17] indican, es un sistema de medida de respuesta rápida del tipo SI/NO y puede responder a distintas situaciones: presencia/ausencia de un determinado analito en una muestra. Se analizaron inicialmente cinco patrones para determinar el tiempo de retención del clorotalonil, el promedio obtenido de los tiempos de retención fue de 4.068 min, los valores obtenidos fueron desde 4.060 a 4.077 min.

Ahora bien, este análisis se realizó para comparar adecuadamente mediante la variable del tiempo de retención si existe presencia o no del analito en las muestras analizadas. En la Figura 2 se observa el cromatograma para uno de estos patrones estudiados, en este se observa una señal con un tiempo de retención de 4.077 min. Tal como se mencionó anteriormente, el promedio del tiempo de retención fue de 4.068 min; por tanto, este es el tiempo que se toma de referencia para realizar la comparación con las muestras estudiadas en esta investigación; no obstante, si el tiempo de retención obtenido para las muestras coinciden en los dos primeros dígitos con el tiempo de retención de referencia, se evidencia que la señal corresponde al fungicida.

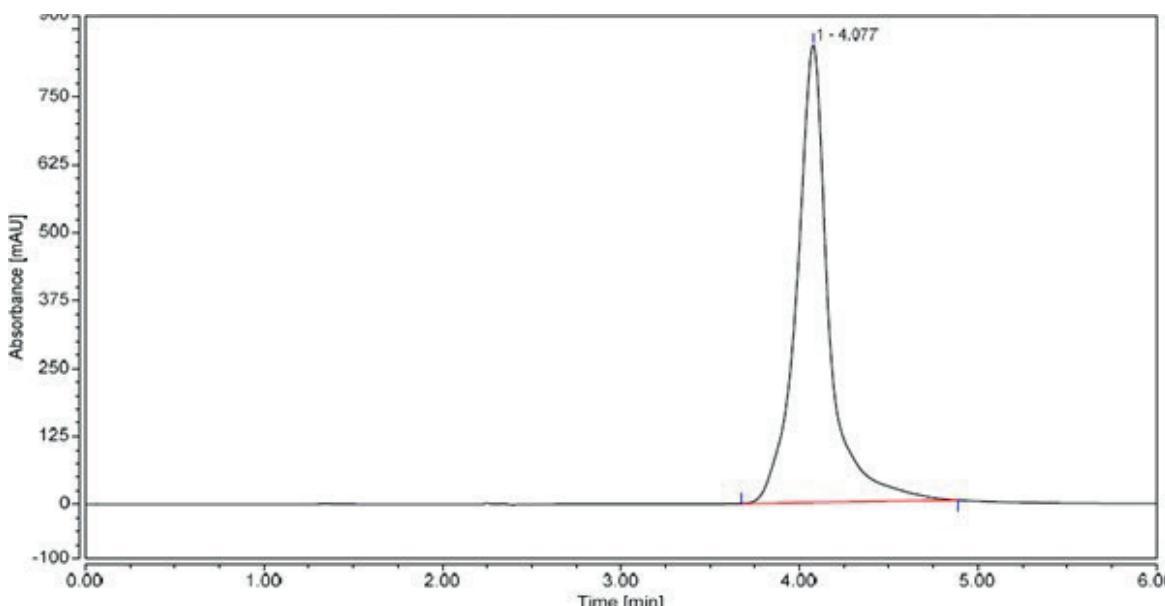


Figura 2. Patrón de comparación del tiempo de retención del clorotalonil.

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto al análisis de las muestras se obtuvieron mayormente señales bajas; razón por la cual el análisis se mantuvo de carácter cualitativo, por tanto, en el Cuadro 2 se presentan los tiempos de retención obtenidos para cada una de las muestras analizadas, en este se puede observar que se encontró la presencia del clorotalonil en cuatro de las muestras estudiadas, específicamente se encontró el analito de interés en la muestra proveniente de una casa en la zona de Cirrí ($Tr = 4.000$ min), también se encontró en la muestra proveniente de una ASADA en la zona de Grecia ($Tr = 4.027$ min), seguidamente se encontró en la muestra proveniente de una ASADA en la zona de Palmira ($Tr = 4.073$) y finalmente, se encontró la presencia de clorotalonil en la muestra proveniente de una casa en la zona de Cipreses ($Tr = 4.037$ min).

Cuadro 2. Tiempo de retención obtenido para las muestras analizadas

Lugar	Zona proveniente	Tiempo de retención (min)
Escobal	ASADA	3.980
Escobal	Casa	3.643
Cirrí	ASADA	3.970
Cirrí	Casa	4.000
Grecia	Acueducto	4.027
Grecia	Casa	3.773
Palmira	Acueducto	3.043
Palmira	Casa	4.073
Cipreses	ASADA	3.997
Cipreses	Casa	4.037

En relación con lo anterior se puede observar en la Figura 3, las señales obtenidas para las muestras de agua potable obtenidas de la zona de Cirrí, en esta se observa que para la zona de casa en la Figura 3 (b) el tiempo de retención obtenido fue de 4.000 min lo cual evidencia que existe presencia del clorotalonil, adicionalmente en la muestra tomada en la ASADA (Figura 3 (a)) se observa una señal en el minuto 3.970, este tiempo se encuentra muy cercano al tiempo de retención definido para el fungicida; sin embargo, no se puede asegurar que se trate del clorotalonil en este caso.

Ahora bien, esta zona se caracteriza por la agricultura, sobre todo de café; incluso el cantón de Naranjo es uno de los cantones más cafetaleros del país [18]. La presencia del clorotalonil en la fuente de agua puede deberse a la baja persistencia en aguas y suelos, donde en condiciones de mala aireación su vida media está entre 5-15 días como en el caso de las tuberías [19]. Por otra parte, la presencia de este agroquímico es de suma importancia, ya que el clorotalonil y sus productos de degradación en el agua en Costa Rica se han relacionado con diversas enfermedades graves al hígado y los riñones, además de ser un posible carcinógeno en humanos[20]; adicionalmente, existen estudios donde se realizaron evaluaciones de la toxicidad de los pesticidas utilizados en Costa Rica, donde se concluyó que Terbufos y Clorotalonil son responsable de más del 90% del envenenamiento humano [11].

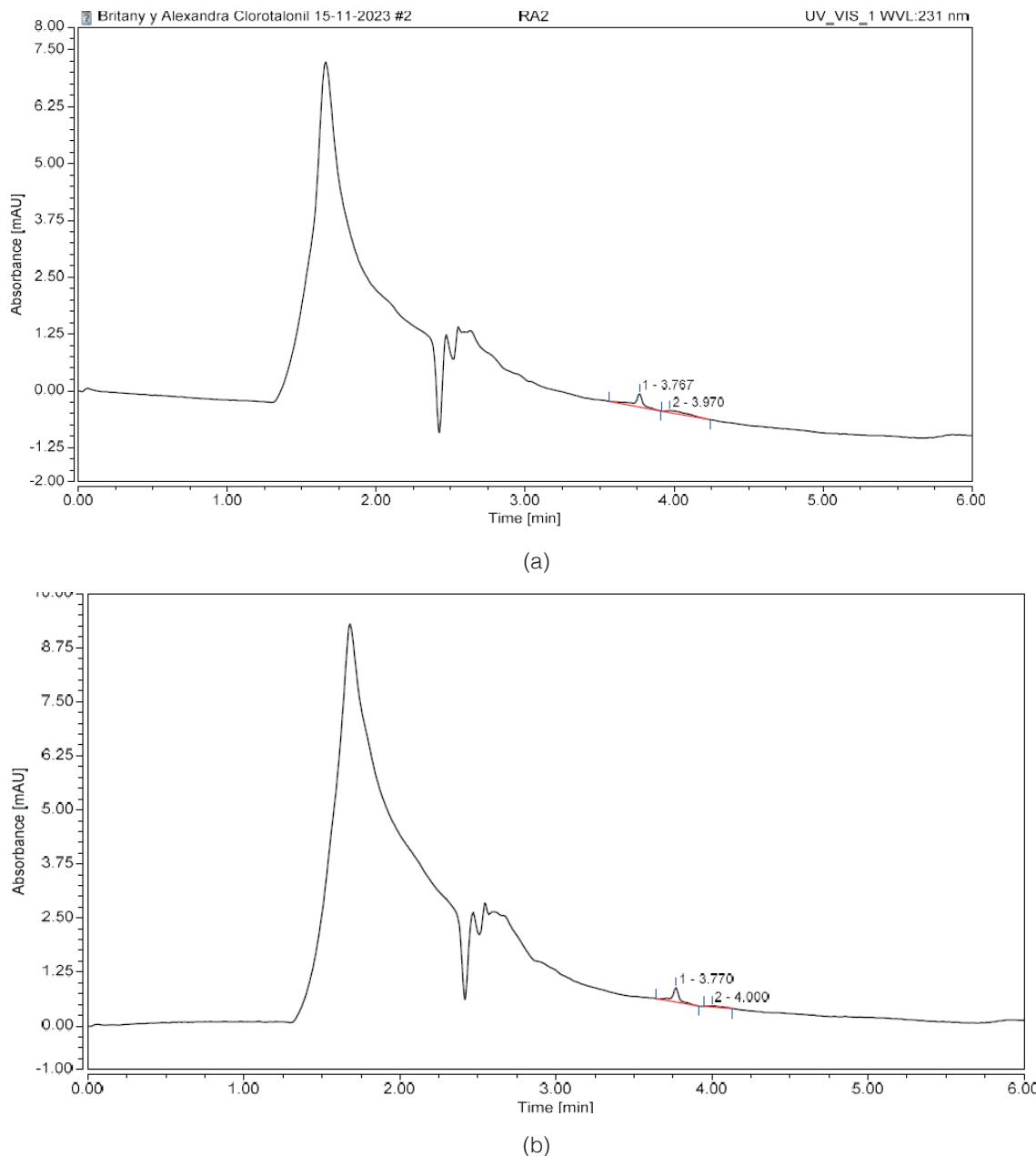


Figura 3. Resultados obtenidos de las muestras de Cirrí (a) Muestra proveniente de ASADA. b) Muestra proveniente de casa del lugar. **Fuente:** Elaboración Propia.

Para el análisis realizado de Grecia como se puede apreciar en el Cuadro 2 y en la Figura 4 (a), la muestra proveniente del acueducto presenta una señal en el minuto 4.027, a pesar de que esta señal es baja, indica contaminación con el fungicida en la fuente del agua. Esta contaminación puede ser producida por el cultivo del café, donde el uso generalizado de plaguicidas en la agricultura como único método para controlar los problemas fitosanitarios de los cultivos está ocasionado serias afectaciones en la salud de personas, contaminación y deterioro de los ecosistemas [21], es importante resaltar que debido al alto desempeño del clorotalonil en muchas infestaciones en varios cultivos [11] se presta para que su uso se generalice, lo cual es una práctica incorrecta.

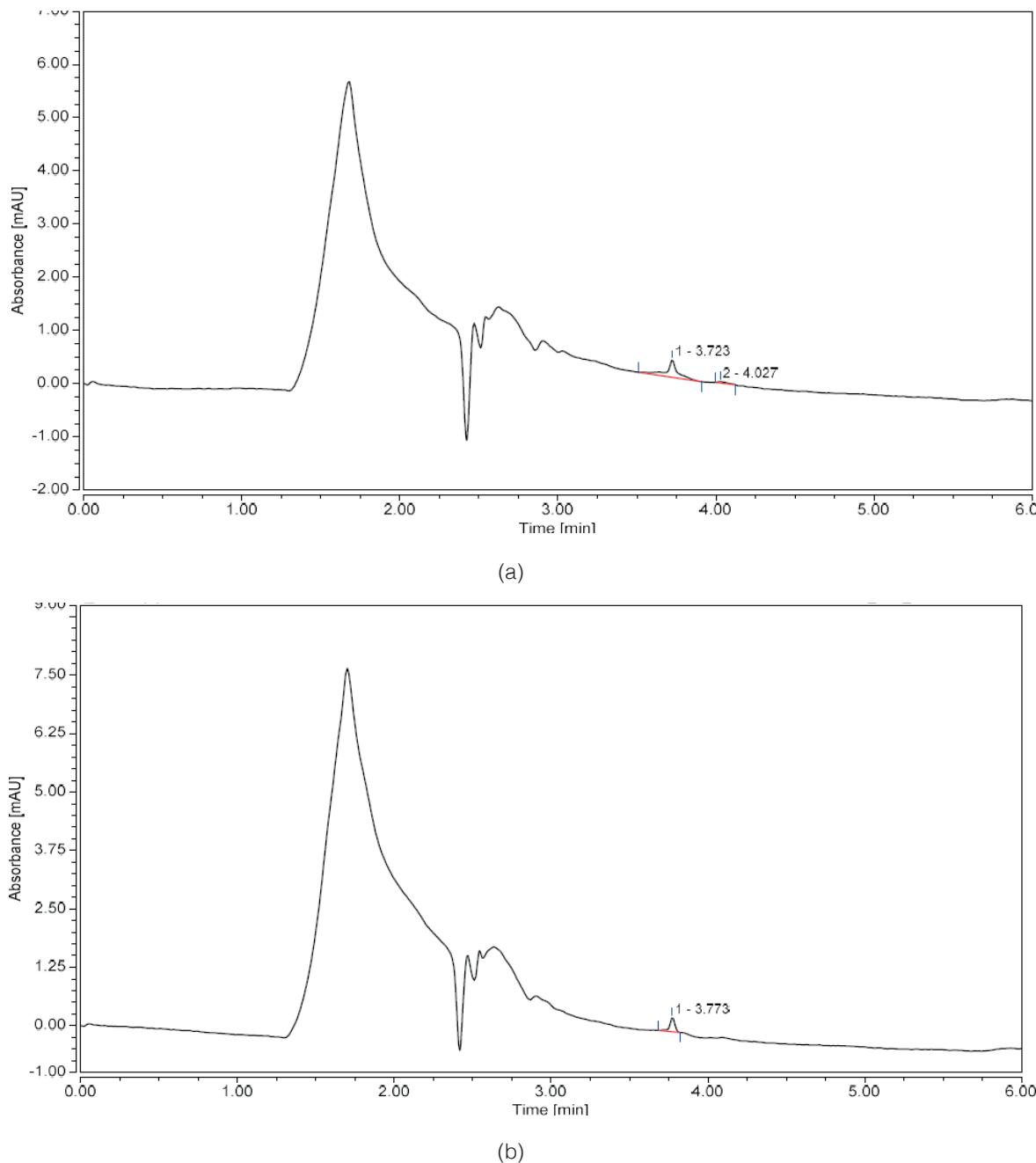


Figura 4. Resultados obtenidos de las muestras de Grecia (a) Muestra proveniente del acueducto. (b) Muestra proveniente de casa del lugar. **Fuente:** Elaboración Propia.

De acuerdo con lo mencionado por [19], investigaciones realizadas por el Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET), plasma que dos de los ingredientes activos más comunes en los plaguicidas de mayor uso en Costa Rica y cuya presencia ha sido evidenciada en diversas matrices ambientales, incluyendo el suelo y el agua, son el clorotalonil y clorpirifos. Por lo cual, su presencia en aguas cercanas a zonas agrícolas no es de extrañar. Sin embargo, no se debe olvidar que este fungicida es sumamente tóxico para aves, peces e invertebrados acuáticos, donde en humanos causa problemas en la dermatitis, problemas gastrointestinales, irritaciones severas de ojos y piel; y es un agente causante de cáncer [11] [12].

En cuanto a los resultados de la zona de Palmira, como se puede observar en la Figura 5, la muestra proveniente del acueducto no presenta clorotalonil. Sin embargo, la muestra proveniente de la casa sí presenta este funguicida, al presentar una señal con un tiempo de retención de 4.073 min. Esto indica que el agua potable no está contaminada en la fuente de salida (acueducto), pero puede estarse contaminando en las tuberías que van a las casas.

En relación con lo anterior, se puede inducir que la contaminación del agua potable se está dando por filtración o recurrencia del agroquímico a las aguas potables, esto podría ser ocasionado por las plantaciones de café, ya que este fungicida es usado en estos cultivos, pese a ser clasificado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer (IARC) y la Unión Europea (UE), como un agroquímico altamente peligroso, porque puede producir cáncer o causar efectos irreversibles en la salud. Además, de ser el clorotalonil un posible causante de la disruptión endocrina [12] [22].

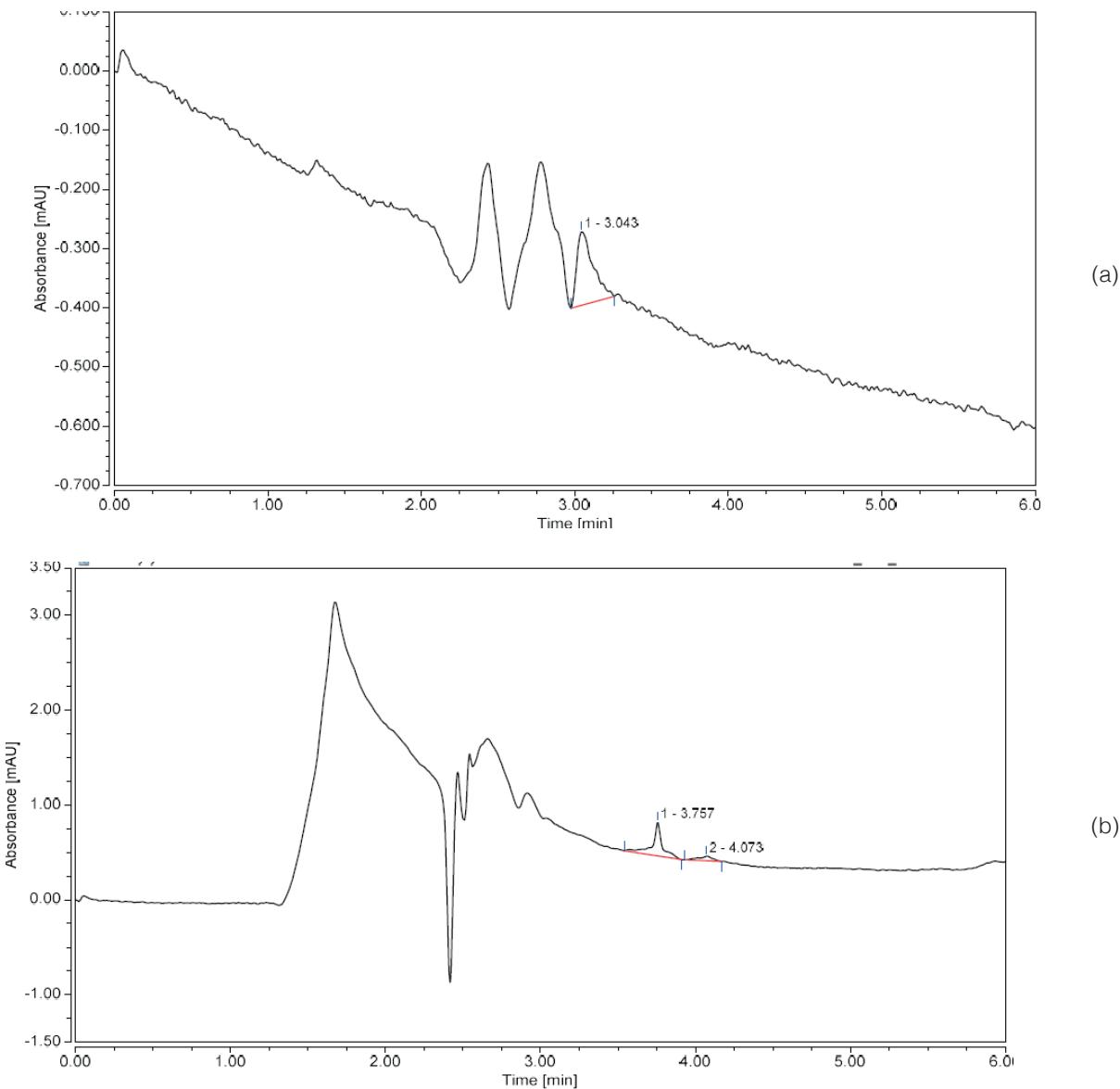


Figura 5. Resultados obtenidos de las muestras de Palmira (a) Muestra proveniente del acueducto. (b) Muestra proveniente de casa del lugar. Fuente: Elaboración Propia.

Ahora bien, en cuanto a las muestras de la zona de Cipreses, se puede observar en el Cuadro 2 y en la Figura 6, que el tiempo de retención obtenido para la muestra proveniente de la ASADA fue de 3.997 min, este valor se encuentra muy cercano al valor estipulado de 4.0000 min, por tanto, se puede considerar que hay presencia de clorotalonil en esta muestra. Adicionalmente, existen estudios anteriores donde se ha encontrado desde el 2021 presencia de este fungicida en la ASADA en esta comunidad, donde incluso se clausuraron dos fuentes de agua de ambas nacientes [23].

Por otra parte, la muestra proveniente de la casa (Figura 6 (b)) presentó un tiempo de retención de 4.037 min, lo cual evidencia la presencia de clorotalonil en el agua potable, es importante mencionar que, en el caso específico de esta zona, los ciudadanos han presentado quejas formales al gobierno puesto que como se mencionó anteriormente se han encontrado concentraciones alarmantes en esta comunidad [23].

Razón por la cual se incluyó esta zona en este estudio, para verificar si las autoridades han trabajado en las acciones para eliminar este compuesto del agua potable, mediante la prohibición del uso del clorotalonil en los cultivos. Donde, la Presidencia Ejecutiva concluyó en el 2020 sobre el caso que, en base a la evidencia, las autoridades y unidades competentes al caso debían tomar acción para solucionar este problema y poner los parámetros en reglamentación [20].

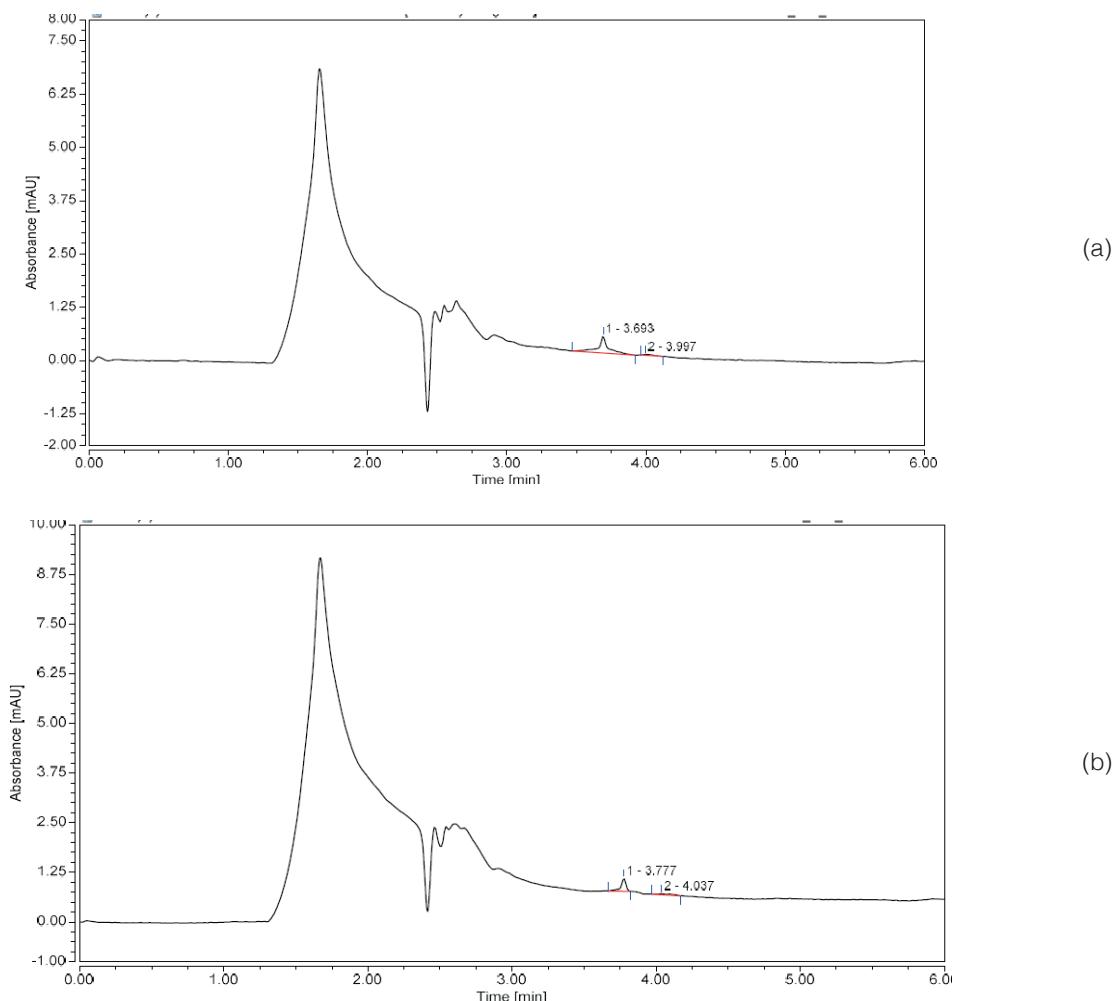


Figura 6. Resultados obtenidos de las muestras de Cipreses (a) Muestra proveniente de ASADA. (b) Muestra proveniente de casa del lugar.

Pese a lo anterior, en este estudio se determinó que, si hay presencia del fungicida tanto en la ASADA como en la muestra proveniente de la casa, esto evidencia que las autoridades a cargo no han realizado acciones efectivas, ya que el mandato presentado en el 2020, de haberse cumplido y solucionado la problemática, no deberían quedar rastro de los metabolitos de clorotalonil en las aguas potables.

Finalmente, es importante mencionar que, aunque la magnitud de clorotalonil no se cuantificó en este estudio, se evidenció por medio de este análisis cualitativo que existe presencia del fungicida en las muestras de agua potable mencionadas. Ahora bien, se puede inferir por las señales obtenidas en los cromatogramas que las concentraciones del clorotalonil son bajas, sin embargo, esto no aliviana la problemática, ya que la cantidad de clorotalonil permitido por el Reglamento de Reglamento de la Calidad del agua indica que no puede sobrepasar los 0,1 µg/L, debido a su gran toxicidad; considerando que se mantenga un contacto directo con el fungicida y no una ingesta diaria de él. Por lo cual, las repercusiones actuales que podría estar provocando en la población cercana a la zona, podrían ser irremediables [12] [14] [22].

Conclusiones

El estudio evidencia la presencia de clorotalonil en el agua potable de diversas comunidades agrícolas en Costa Rica. Se encontró la presencia de este fungicida en muestras de ASADAS y hogares en zonas como Cirrí, Escobal, Palmira y Cipreses. Estos hallazgos resaltan la persistencia del clorotalonil en el entorno y subrayan la necesidad de fortalecer las medidas de control y vigilancia de este contaminante.

Aunque las concentraciones detectadas no fueron cuantificables, su presencia constante plantea riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente. Es crucial que se implementen estrategias efectivas para reducir la contaminación por clorotalonil y garantizar la seguridad del agua potable en estas comunidades.

Adicionalmente, se recomienda realizar este estudio con un detector de masas para que se realice la cuantificación de este fungicida a los niveles de concentración requerido.

Bibliografía

- [1] J. Virkutyle y M. Sillanpaa. "Chemical evaluation of potable water in Eastern Qinghai Province, China: Human health aspects" *Environment International*, vol. 32, pp 80-86, 2008.
- [2] Organización Mundial de la Salud. Agua potable, 2023.
- [3] A. Murillo. "El agua también es sagrada" Cómo un pesticida prohibido en Europa le robó el agua a un pueblo en Costa Rica. *Revista Public Eye*, 2023.
- [4] R. Chapagain. "International regulations of the use of pesticides: The Costarican experience". Escuela de Relaciones Internacionales y Diplomacia, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, vol. 2, pp 124-129, 2011.
- [5] Organización Panamericana de la Salud. "Efectos de los plaguicidas en la salud y el ambiente en Costa Rica" Organización Panamericana de la Salud, Ministerio de Salud. 2003.
- [6] G. Flores, M. Molina, Q. Balza, D. Benítez y C. Miranda. "Residuos de plaguicidas en aguas para consumo humano en una comunidad agrícola del estado Mérida, Venezuela". *Investigación Clínica*, vol. 52, pp 295-311, 2011.
- [7] D. Alburqueque y R. Gusqui. "Eficacia de fungicidas químicos para el control in vitro de diferentes fitopatógenos en condiciones controladas". *Arnaldoa* vol. 25, 489-498, 2018.
- [8] J. Melgarejo y F. Abella. "Mecanismo de acción de los fungicidas" *Revista Ventana al Campo*, pp. 193-202, 2011.
- [9] H. Montoya. *Microbiología básica para el área de la salud y afines*. 2da. Editorial Universidad de Antioquia, 2008.

- [10] E. López y R. Rodríguez. "Comparación de dos métodos cromatográficos para determinar clorotalonil en un fungicida comercial". UNED Research Journal vol. 11, pp 334-344, 2019.
- [11] J. Betancourt, P. Bautista, S. Narváez y J. Parra. "Biodegradation of Chlorothalonil Fungicide in Coastal Areas of the Colombian Caribbean Suitable for Banana Crops". TECCIENCIA vol. 13, pp 19-28. 2018.
- [12] F. Ramírez, M. Fournier, C. Ruepert y C. Hidalgo. "Uso de agroquímicos en el cultivo de papa en Pacayas, Cartago, Costa Rica". Agron. Mesoam, vol. 25, pp 337-34. 2014.
- [13] V. Luzuriaga. "Diseño de un proceso de irradiación, parar degradar a los pesticidas Clorotalonil, Metolaclor y Clorpirifos, presentes en aguas de una florícola, mediante el efecto de la radiación ionizante β , proveniente de un acelerador de electrones" (Bachelor's thesis), 2014.
- [14] Poder Ejecutivo. "Reglamento para la Calidad del Agua Potable. San José: La Gaceta N° 84", 2005.
- [15] D. Suarez y Y. Morales. "Principios básicos de la cromatografía líquida de alto rendimiento para la separación y análisis de mezclas" Revista Semilleros: Formación Investigativa, vol. 4, 2018.
- [16] M. Gallardo. "Determinación de plaguicidas en aguas de una zona vitivinícola de la VI Región por medio de técnicas cromatográficas". [Tesis para optar al grado de Licenciado en Química Ambiental], 2010.
- [17] I. Ruisánchez, E. Trullols y F. Rius. "Validación de métodos analíticos cualitativos" Técnicas de laboratorio vol. 81, 328-335, 2003.
- [18] F. Ruiz. (2023, junio, 25). "Costa Rica es el 15.º productor mundial de café; vea dónde se produce más y a dónde se exporta" [Online]. Disponible en: <https://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/costa-rica-es-el-15-productor-de-cafe-del-mundo/RVSVQC5MOZFURC3Q5IZV47UEBY/story/>
- [19] F. Masís, J. Valdez, T. Coto, y S. León. "Residuos de agroquímicos en sedimentos de ríos, Poás, Costa Rica". Agronomía Costarricense, vol. 32, 113-123, 2008.
- [20] R. Gutiérrez. "RESPUESTA PÚBLICA A LA PRESIDENCIA DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS", 2022.
- [21] G. Estrada, C. Umaña, B. Sancho y A. Orozco. "Aislamiento, identificación y caracterización de cepas bacterianas con potencial de degradación de los plaguicidas clorotalonil y clorpirifos". Uniciencia, vol. 37, 481-496, 2023.
- [22] M. Ramírez, L. Fournier, C. Ruepert y A. Hidalgo. "Uso de agroquímicos en el cultivo de papa en Pacayas, Cartago, Costa Rica". Agronomía Mesoamericana, vol. 25, 339-345, 2014.
- [23] A. Martínez. (2023, enero, 25). Estudio encuentra moléculas de plaguicida 240 veces más de lo permitido en agua de Cipreses de Cartago. [Online]. Disponible en: <https://delfino.cr/2023/01/estudio-encuentra-molculas-de-plaguicida-240-veces-mas-de-lo-permitido-en-agua-de-cipreses-de-cartago>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Guía metodológica para la limpieza de espacios públicos

Guideline for public places cleansing

Melvin Andrade-Velásquez¹, Lilliana Abarca-Guerrero²

Fecha de recepción: 20 de junio, 2024
Fecha de aprobación: 5 de octubre, 2024

Andrade-Velásquez, M; Abarca-Guerrero, L. Guía metodológica para la limpieza de espacios públicos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 1. Enero-Marzo, 2025. Pág. 139-151.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7176>

1 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Ingeniería Ambiental, Costa Rica

 melvinandradevelasquez@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0001-6481-3743>

2 Escuela de Química, Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Química, docente e investigadora, Costa Rica

 labarca@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5129-3104>

Palabras clave

Residuos; residuos marinos; limpiezas de espacios públicos; contaminación marina; guía limpieza.

Resumen

Costa Rica realiza esfuerzos de prevención de la contaminación marina de diversas formas, siendo una de ellas las campañas de limpieza de espacios públicos. No existe en el país una única metodología de recolección y registro de datos, que permita la comparación de estos y poder identificar el avance que hace el país, con respecto al mejoramiento del saneamiento en esos espacios. Esta guía es el resultado del análisis de varias metodologías utilizadas por grupos organizados en el país, ya sean Organizaciones no Gubernamentales Internacionales o Nacionales, así como de conversaciones con grupos o individuos que contribuyen también en esa tarea de apoyar la reducción de los desechos que llegan al mar, ya sea por actividades terrestres o en las costas.

Para su creación se efectuó el análisis de la situación actual de la limpieza de espacios públicos, obteniendo información general de bases de datos y entrevistando a responsables de organizaciones que realizan esta actividad. Se pudo determinar que, la mayoría de las organizaciones no cuentan ni conocen una guía metodológica para la limpieza de esos espacios, no recolectan datos, no poseen una metodología para la cuantificación de residuos recolectados y tampoco puedan socializar los datos obtenidos en las limpiezas, debido a la falta de una plataforma donde hacerlo.

La implementación de esta guía metodológica permitirá mejorar la recolección de datos sobre la contaminación marina en Costa Rica, así como promover la participación activa y segura de la ciudadanía en la protección de los ecosistemas marinos.

Keywords

Waste; marine litter; public space clean-ups; marine pollution; cleaning guide.

Abstract

Costa Rica makes efforts to prevent marine pollution in various ways, one of them being public space cleaning campaigns. There is no single methodology in the country for collecting and recording data that allows for comparison and identification of the progress made in improving sanitation in these spaces. This guide is the result of analyzing several methodologies used by organized groups in the country, whether they are International or National Non-governmental Organizations, as well as conversations with groups or individuals who also contribute to supporting the reduction of waste that reaches the sea, either through land activities or on the coasts.

To create this guide, an analysis of the current situation of public space cleaning was carried out, obtaining general information from databases and interviewing responsible organizations that promote these activities. It was determined that most organizations do not have or know of a methodological guide for cleaning these spaces, do not collect data, do not have a methodology for quantifying collected waste, and cannot share the data obtained in clean-ups due to the lack of a platform to do so. The implementation of this guide will improve data collection on marine pollution in Costa Rica, as well as promote active and safe participation of citizens in the protection of marine ecosystems.

Introducción

Costa Rica ha adoptado la definición de residuos marinos o basura marina propuesta por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la cual indica que es “todo material sólido persistente, manufacturado o elaborado, que se desecha, elimina o abandona en el medio marino y costero y es transportado por fuentes tanto terrestres (ríos, vertederos de basura, residuos de actividades recreativas, etc.) como marinas (naves, vertimientos ilegales, desechos de pesca y acuicultura, etc.)” [1]. Estos son una problemática para esos ecosistemas, así como también conllevan un riesgo para la salud humana, afectando sectores económicos vitales como el turismo, la pesca, la acuicultura o el suministro de energía, provocando pérdidas financieras a las personas, empresas y comunidades [2].

Los residuos marinos provienen de fuentes terrestres, siendo transportados a través de ríos y quebradas o bien, por el viento y las lluvias. Por su parte, el sector pesquero y de navíos mercantes, turísticos y de pasajeros aportan residuos adicionales, incrementando la situación antes mencionada [3]. Se estima que, de las 4000 toneladas de residuos sólidos generados diariamente en 2014, un 25% terminaron en ríos y playas, de los cuales alrededor de 110 toneladas eran residuos plásticos [4]. Esto ha generado un problema de contaminación en las comunidades, playas, ríos, bosques, y todo tipo de espacios públicos en el país.

Para enfrentar este problema se pueden realizar muchas acciones siendo una de ellas la limpieza de espacios públicos. En estas se considera la recolección de los residuos y el posterior reporte de los resultados obtenidos de tal manera que, se pueda analizar la información y posteriormente el desarrollo de políticas públicas que busquen la prevención de los residuos que llegan a los ecosistemas. Este artículo reporta la investigación realizada que tuvo como objetivo desarrollar una guía metodológica para la limpieza de espacios públicos, que permita a organizaciones o personas interesadas utilizarla para la organización de ese tipo de actividades, contribuyendo al mejoramiento ambiental.

Situación de los residuos marinos en el mundo

El crecimiento de la población humana y el aumento de la densidad de sus poblaciones costeras, que viven a menos de 200 km de la costa conlleva un aumento de la generación de residuos sólidos [5], [6].

Diferentes investigaciones han demostrado que los materiales flotantes más abundantes y persistentes, encontrados a lo largo de las riberas y playas de varias partes del mundo, son los plásticos [7]–[8]. Esto se debe principalmente a los envases y productos de consumo, que incluye botellas de bebidas y sus tapas, bolsas de compras, envases de alimentos, pajillas, colillas de cigarrillos y papel film, conocidos como plásticos de un solo uso [9], cuyo origen es de materias primas fósiles vírgenes, representando alrededor del 6% del consumo mundial de petróleo [10]. Estos materiales permanecerán como residuo en el medio marino durante mucho tiempo, debido a su persistencia y a la gran cantidad presente, indicándose que aún si se redujese a cero dicho consumo actual no desaparecerían de los ecosistemas durante décadas o incluso siglos [11].

Fuentes de contaminación de los residuos marinos

Se estima que, en el mundo, el 80% de los residuos sólidos de las playas provienen de los ríos más cercanos a la costa. Este patrón ha sido confirmado por diversos estudios, donde se muestra la importancia que poseen como origen de la contaminación marina [7], [12], [13], [14]–[15].

La abundancia y composición de los residuos, en los ríos, en las riberas de estos y en las playas, está determinada por el uso de la tierra y las actividades sociales o económicas en la zona costera o fluvial y su distribución continental, la cual puede estar relacionada con factores ambientales y climáticos, como corrientes, olas y viento [7], [16], [12], [17]–[18].

Impactos por residuos marinos

Los residuos marinos causan daños económicos, sociales y ambientales y algunos de los efectos están relacionados, en mayor o menor medida, con la salud humana, aunque quizás el principal problema se enmarca en términos ecológicos y de biodiversidad [11].

Los tipos de plástico que dañan el bienestar de animales, humanos y hábitats, comprenden tres categorías amplias, el primero, incluye piezas de plástico más grandes como redes de pesca; en la segunda categoría se encuentran las piezas de plástico más pequeñas, denominadas como “microplásticos” (de 1-5mm) y en el tercer lugar están los “nanoplásticos” (menos de 1 mm) [11].

Los pequeños trozos de plástico son devorados por animales acuáticos que los confunden con comida, tanto de la costa como del océano, incluso por fauna existente en las cuencas y desembocaduras de los ríos. Este consumo puede provocar indigestión, así como muerte por asfixia o inanición; según el lugar donde se atasquen pueden transferir contaminantes químicos y microbiológicos. Entre la fauna que está ingiriendo estos residuos destacan: aves marinas, peces, ballenas, crustáceos y moluscos. Adicionalmente, estos materiales están obstruyendo los arrecifes de coral y están quedando atrapados en el hielo marino del Ártico [9], [11], [19]–[20].

Según estudios recientes, el intercambio de residuos que se da entre las costas y el mar, puede generar impactos ecológicos negativos causados por residuos marinos flotantes plásticos, los cuales, pueden propiciar la dispersión y el traslado (migración inducida) de especies exóticas depredadoras de invertebrados marinos [2], [21].

Los residuos marinos provocan afectaciones a nivel económico, que si bien, la cuantificación total aún no está clara, los estudios iniciales sugieren que son al menos 13 mil millones de dólares por año. Por otra parte, la Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC), estima que el costo de los plásticos oceánicos para las industrias del turismo, la pesca y el transporte marítimo fue de 1,3 mil millones de dólares solo en esa región [10], [22]. En Europa, donde las fugas económicas son relativamente limitadas, los costos potenciales de la limpieza de costas y playas podrían alcanzar los 630 millones de euros (695 millones de dólares) al año [10].

Limpieza de playas, ríos y otros espacios en el mundo

La problemática de los residuos marinos ha incentivado la creación de Organizaciones No Gubernamentales (ONG) que luchan contra la contaminación, ya sea a través de limpieza de playas locales con métodos tradicionales u otras técnicas novedosas y originales. Todas estas iniciativas colectivas lograron en el año 2008, que la Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante (DIRECTEMAR) apoyara la creación del “Día Internacional de Limpieza de Playas”, coordinando más de 100 limpiezas de playas anuales [1].

Las limpiezas de ríos, playas y otros espacios públicos, son llevadas a cabo en su mayoría por ONGs mediante el modelo de voluntariado. Un ejemplo de esto es la ONG Ocean Conservancy, que a través de su programa International Coastal Cleanup, cuenta con aproximadamente 60.000 voluntarios en todo el mundo para realizarlas anualmente [1].

La mayoría de las ONG que realizan limpiezas de espacios públicos no poseen una guía para su realización, la cual permite la sistematización y documentación del proceso, actividad, práctica o metodología donde en ella se describen las distintas operaciones o pasos en su secuencia lógica, señalando generalmente quién, cómo, dónde, cuándo y para qué han de

realizarse [23]. Tampoco muchas organizaciones reportan datos tales como: la cantidad de limpiezas realizadas al año, tipo y forma de disposición de los residuos recolectados, cantidad de participantes y entidades que apoyan la gestión, área limpiada, tiempo de limpieza, entre otra información. La recolección de datos se vuelve importante ya que permite crear una línea base y determinar la contaminación de la costa, monitoreando por un lapso mínimo de 5 años y poder así determinar, influencias en los patrones tales como la temporada del año donde se obtengan los datos, las condiciones meteorológicas y las corrientes marinas, entre otras [24].

Situación de los residuos marinos en Costa Rica

La mala gestión de los residuos sólidos en zonas urbanas y el mal manejo de las cuencas hidrográficas afecta a los ríos, donde se evidencia el problema de la contaminación ya que, al ser arrojados por las personas en las calles, aceras, caños o directamente al río, son arrastrados por el agua, llegando a las costas [4], [25].

Según el Ministerio de Salud, el manejo inadecuado de los residuos sólidos representa uno de los mayores problemas ambientales del país, siendo el plástico el que mayor impacto provoca en las ciudades, ríos y playas, induciendo malos olores, generación de lixiviados, proliferación de insectos y otros vectores que pueden dañar la salud humana y el ambiente [4], [26], [27]. Además, se estima que, de las 4000 toneladas de residuos sólidos generados diariamente en el 2014, un 25% terminó en ríos y playas, de los cuales, alrededor de 110 toneladas eran residuos plásticos [4], [25].

Los ríos, estuarios, canales y otros cuerpos de agua, son de los medios más importantes por donde se transporta la mayoría de los residuos (sólidos y líquidos), generados en las diferentes fuentes de contaminación ubicadas en las franjas costeras y en el mar [28]–[29]. Un ejemplo de esto es la cuenca del Río Grande de Tárcoles, el cual drena hacia la costa Pacífica y sus aguas acarrean los residuos de las poblaciones que viven en el Valle Central [30] causando grandes gastos a la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) para eliminar los residuos de los ríos que pueden dañar las turbinas de las plantas generadoras de electricidad [31].

El país carece de estudios que generen información científica sobre los orígenes, fuentes u otros temas relacionados con la problemática de los residuos marinos, siendo uno de los pocos el realizado por el Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR) durante los periodos 2000-2003. Los resultados obtenidos indican que, en Playa Blanca en el Golfo de Nicoya, inmediatamente después de los días feriados y fines de semana, la fuente u origen más importante de generación de residuos sólidos provenía de los turistas que la visitaron [29].

En los últimos años, el incremento de las actividades socioeconómicas en las zonas costeras se ha acelerado, aumentando la presión del uso de espacios y recursos naturales, lo cual juega un papel importante en su deterioro en términos ambientales [32]. El turismo es una fuente de riqueza, donde en el último quinquenio aportó, en promedio, el 5% del Producto Interno Bruto (PIB) [33].

Limpiezas de playas, ríos y otros espacios en Costa Rica

En Costa Rica las limpiezas de playas, ríos y otros espacios públicos son organizadas en su mayoría por ONGs como Ríos Vivos, Green Wolf, Nicoya Península Waterkeeper, Asociación de Mujeres Afro de Cocles, entre otras cuya misión está orientada a temas de limpieza, reciclaje, educación ambiental y conservación [34]. Además, se desarrollan acciones por personas individuales o grupos de ellas que realizan actividades centradas en la reducción de los impactos antrópicos mediante la recolección de residuos para el reciclaje, reforestación, conservación de tortugas, limpieza de playas, entre otras [34].

Las limpiezas de espacios públicos contribuyen, además, en la educación ambiental de sus habitantes, ya que estas propician cambios en actitudes, hábitos y valores en las personas participantes y en las comunidades beneficiadas [35].

Valorización de residuos marinos

Dentro de los residuos marinos podemos encontrar materiales que son valorizables, como las botellas de vidrio, aluminio u otro material metálico pero el plástico, encontrado en el mar o las costas presenta problemas para su valorización, ya que, al estar bajo condiciones de salinidad, erosión por fricción, luz solar, etc., poseen un nivel de degradación muy alto y con alteraciones en las propiedades físico-mecánicas de los polímeros, que dificulta su reciclado [36].

Cuando estos residuos resultan de muy baja calidad y presentan dificultades para ser valorizados materialmente, se puede considerar la alternativa de una valorización energética, con la obtención de un combustible sólido recuperado a partir de estos residuos retirados del mar, según lo que indican algunos autores [36]. Otra opción a considerar, es la producción de artesanías, que se puedan vender incluso para recolectar fondos para nuevas campañas de limpieza; un ejemplo es la empresa 4Ocean, que transforma lo recolectado en pulseras, que luego venden a nivel global para financiar proyectos que ayuden a reducir los residuos marinos [1].

Materiales y métodos

Este trabajo incluyó una revisión de literatura relacionada con limpieza de espacios públicos de donde se obtuvieron las siguientes variables a analizar: el tipo de escogencia del lugar donde se realizará la limpieza, revisión del clima, los riesgos asociados a la limpieza, preparación del sitio, contacto con actores, financiamiento, manejo de la convocatoria, registro de voluntarios, materiales de limpieza y vestimenta, seguridad, disfrute de la comunidad, plan de caracterización y clasificación de los residuos, instrucciones para la bienvenida y cierre, disposición final y retorno de los residuos, recolección de datos y muestreo de campo y evidencias.

Se realizó una revisión de la base de datos provista por la ONG Peninsula Waterkeeper la cual incluía una lista de 151 organizaciones o personas que realizan limpiezas permitiendo realizar una actualización de la información general de ellas tales como: región o área de influencia, nombre de la organización o grupo, nombre de la persona representante, categoría de limpieza que realizan y obtener al menos un medio de contacto como: número de teléfono, dirección de correo electrónico, dirección de página web y usuarios de redes sociales. Además, categorizar las organizaciones según las provincias o regiones donde realizan las limpiezas de espacios públicos.

Se preparó una encuesta aplicada por Google Form a una muestra seleccionada de 102 organizaciones obtenida de esa base de datos. La selección se sustentó en las organizaciones que contaban con algún tipo de contacto, como correo electrónico, teléfono o redes sociales válidos. El objetivo de la encuesta fue recopilar información respecto a datos generales de la región de influencia, nombre de la organización, correo electrónico, número de contacto, contacto de las redes sociales, si cuentan con oficina, cantidad de trabajadores, cantidad de personas voluntarias que colaboran en la organización, generación de fondos propios, si cuentan con una guía de limpieza de espacios públicos, la cantidad de limpiezas que realizaron en los últimos 3 años y si son parte de una organización internacional, que permitiera obtener una idea del contexto a nivel nacional de las limpiezas de espacios públicos.

Se planificaron tres visitas a diferentes tipos de limpiezas de espacios públicos. Estas tuvieron el objetivo de observar y consultar a las personas líderes de la actividad, las acciones que ellos planifican. Estas se realizaron a:

1. Limpieza de manglar y playa: Playa Guacalillo, Tárcoles, en el cantón de Garabito, Puntarenas, organizada por Guarumo Restauración y Green Wolf.
2. Limpieza de espacios urbanos, organizada por Ríos Libres, realizada en los alrededores de la vía del tren en el Barrio Aranjuez, del distrito El Carmen, San José
3. Limpieza de calles públicas, en los alrededores del centro comercial Cartago, distrito Occidental, Cartago, organizada por Eco Runner.

El objetivo fue observar el trabajo que realizaron y consultar a las personas líderes de la actividad respecto al tipo de limpieza, forma de convocatoria, si utilizan o no una guía de limpieza de espacios públicos, forma de realizar bienvenida y cierre, el manejo de grupo, la metodología de recolección de residuos, la gestión y cuantificación de los residuos recolectados, la organización de la seguridad de la limpieza y si cuentan con patrocinios.

Resultados

Los resultados que se presentan a continuación son las respuestas ofrecidas por 27 organizaciones a las que se les contactó directamente, las cuales se agruparon por provincias. Aquellas que no contaban con el dato de lugar o área de influencia o realizan limpiezas en todo el país, se categorizaron en una sección nombrada “otros”. Además, 42 organizaciones contestaron la encuesta y 24 indicaron contar con una guía metodológica para las limpiezas que realizan. Estas últimas fueron contactadas con el fin de solicitarles las guías que ellos tenían para su análisis, de las cuales únicamente 22 compartieron la información.

En Costa Rica la ley N° 8839 “Ley para la Gestión Integral de Residuos” otorga la rectoría en materia de gestión integral de residuos al Ministerio de Salud, con potestades de dirección, monitoreo, evaluación y control. Este ministerio rige las acciones en materia de residuos que realizarán las instituciones públicas, municipalidades, sector privado y universidades, junto a las organizaciones sociales y la comunidad [26]. Contrario a tales atribuciones, esta institución no posee bases de datos de las organizaciones o personas que realizan limpiezas de espacios públicos.

Durante la investigación se determinó que cada provincia de Costa Rica posee organizaciones o personas que realizan limpiezas de espacios públicos, siendo las provincias de Puntarenas y San José las que cuentan con la mayoría de estas, mientras que en Limón y Cartago se tiene una menor cantidad de ellas. También se determinaron dos organizaciones que realizan limpiezas en todo el país y otras ONG que no cuentan con el dato de los lugares donde realizan estas campañas.

Se identificó, que algunas organizaciones no reportan en sus principales medios de comunicación (redes sociales o sitios web), información actualizada de las líneas de acción o las actividades que realizan. La mayoría realizan o participan en limpiezas de espacios públicos, pero también otras actividades como: educación ambiental, ciencia ciudadana, investigación en conservación marina, conservación de tortugas, manejo de residuos sólidos, reforestación, compostaje, educación en recurso hídrico, saneamiento y asesoría ambiental.

Los resultados obtenidos de la información ofrecida en las 42 encuestas enviadas por las organizaciones se presentan a continuación:

- El 80% de los que respondieron realizan sus actividades de limpiezas en una zona específica y el 16,7% participa y organiza limpiezas en todo el país.
- Todas cuentan con redes sociales, como Facebook o Instagram, para su contacto, divulgación de las campañas o mostrar información de sus actividades.

- Únicamente 15 cuentan con un espacio físico de trabajo, poseen mayor estructura interna y facilidad en el desarrollo de actividades de limpieza.
- El 81% cuentan con personal de trabajo asalariado que varía entre 1 y 5 personas, este indicador permite deducir que la mayoría de ellas son pequeñas.
- El 50% de los entrevistados cuentan con menos de 10 voluntarios, un 21% entre 10 y 20, mientras que 29% cuentan con más de 20. Para la participación de personas voluntarias es necesaria para no solo las labores de limpieza, sino también en las tareas de planificación, organización y otras funciones.
- El 52% de las organizaciones consultadas vende servicios para generar fondos, en dichos casos, ofrecen talleres y asesorías en temas ambientales.
- Se observa en la Figura 1.1 la cantidad de campañas de limpiezas realizadas en los últimos cuatro años. Estos datos corresponden a 32 organizaciones, ya que 2 de ellas no realizaron actividades durante ese periodo de tiempo y 8 no respondieron la pregunta.
- El 57% de las organizaciones no cuentan o no conocen una guía de limpieza de espacios públicos dando como resultado un ambiente de trabajo menos seguro para las personas participantes y ausencia de información sobre la actividad. El contar con ella permitiría desarrollar actividades más eficientes.

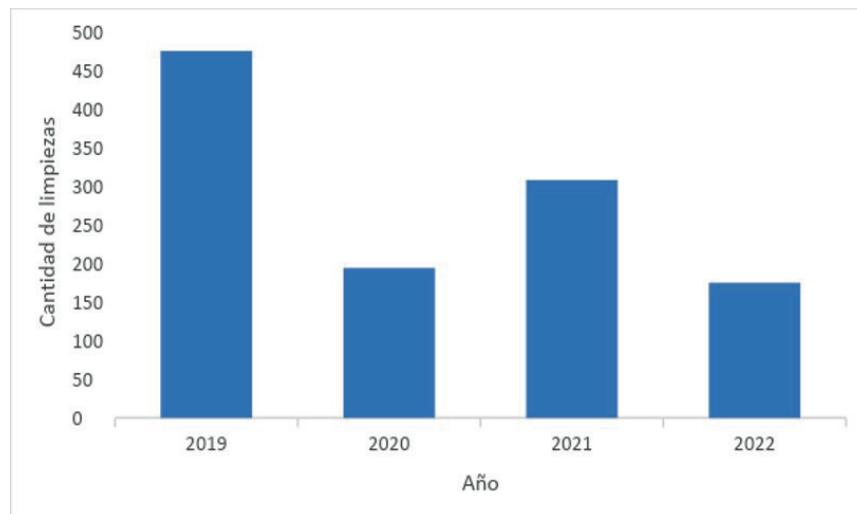


Figura 1. Cantidad de limpiezas realizadas en los años 2019, 2020, 2021 y 2022.

Elementos para la logística de limpieza de espacios públicos

La logística consiste en ocho factores que se describen a continuación:

Visita, peligros y escogencia del lugar de limpieza:

Una visita previa al sitio: en esta se identifican los puntos de acumulación de residuos, los tipos de residuos (ordinarios, peligrosos o bioinfecciosos), las vías de acceso y se determina el tipo de limpieza (río, playa, carretera, zonas baldías entre otras).

Búsqueda de peligros: se determinan los peligros antropogénicos o naturales, los cuales, deberán ser corroborados preferiblemente con personas que viven en la zona de limpieza.

Selección del sitio: este debe ser de fácil acceso, poca peligrosidad, dar prioridad a las zonas con mayor cantidad de residuos peligrosos y con mayor impacto ambiental.

Preparación del sitio:

Se realiza con un máximo de una semana antes del evento, limpiando las rutas de acceso a la zona de la actividad, realizar distintas obras como instalación de gradas, postes y cuerdas para evitar accidentes, asimismo, se demarcan las zonas de trabajo.

Contacto con actores:

Esto deberá realizarse antes del día de la limpieza. Se incluye la municipalidad o recolector privado, centros de acopio, Cruz Roja, policía, entre otros que sean necesarios.

Financiamiento:

Se debe contactar a municipalidades, ferreterías, supermercados u otras empresas que puedan ayudar con las donaciones económicas o de materiales para la limpieza. Se recomienda enviar facturas y evidencia de lo realizado a los patrocinadores o colaboradores posterior a la actividad.

Manejo de la convocatoria y registro de los voluntarios:

Antes del evento, se debe definir la fecha de la limpieza, invitar a organizaciones, instituciones públicas, comunidad, entre otras, a participar de la actividad y realizar un formulario de inscripción para las personas voluntarias que incluya datos personales que se puedan utilizar en caso de una emergencia.

Materiales de limpieza y vestimenta:

Determinar la lista de materiales requeridos y seleccionar el guante adecuado; para la vestimenta es necesario que se priorice la seguridad y comodidad de la persona participante.

Seguridad:

Antes se debe seleccionar la cuadrilla de seguridad, monitorear el clima del lugar unas semanas antes. Durante la limpieza, si se presentan lluvias, rayerías o vientos fuertes, se debe detener la actividad y llevar a los voluntarios a una zona segura. No recolectar residuos peligrosos o bioinfecciosos si no se cuenta con el equipo de protección adecuado. Despues del evento se deben desinfectar los materiales utilizados en la limpieza.

Disfrute de la comunidad:

Primero se deben mapear los sitios turísticos y restaurantes de la zona, luego, compartir información de estos lugares antes de las actividades de limpieza y finalmente, incentivar a que puedan visitarlos para fomentar la economía local.

Plan de acción de la limpieza

La planificación de la limpieza cuenta con tres distintos aspectos:

Plan de caracterización y clasificación de los residuos:

Antes del evento se deben conocer las condiciones en las que deben llegar los residuos valorizables a las organizaciones que los reciben; se definen los residuos a recolectar y la forma de hacerlo según su tipo (valorizables, no valorizables, peligrosos, bioinfecciosos y microplásticos). Durante el evento se debe indicar a los participantes la clasificación y las condiciones en que deben estar los residuos.

Instrucciones de limpieza, bienvenida y cierre:

Antes, se debe recordar a los voluntarios desayunar previo al evento, así como vestir adecuadamente para la ocasión y llevar sus medicamentos. Además, tener preparada la introducción y cierre de la actividad. Durante esta realizar la introducción, dar las indicaciones de seguridad, señalar las rutas de evacuación y las señales de emergencia. Después de la actividad se verifica que las bolsas estén en el centro base y se realiza actividad de cierre.

Disposición final y retorno de los residuos:

Antes, se deben tener definidos los sitios donde se llevarán los residuos, coordinar el lugar y la fecha de recolección. Durante la actividad de limpieza, procede llevar los residuos al sitio de acopio temporal acordado. Después del evento, es necesario confirmar el retiro o movilización de los residuos hasta el centro de acopio, o de transformación, etc.

Sistematización de la recolección de datos para la limpieza

Para desarrollar la sistematización de la limpieza se cuenta con tres factores.

Recolección de datos:

Antes, se debe diseñar la hoja de recolección de datos según los residuos a recolectar y definir la forma en la que se medirá el peso de los residuos. Durante la limpieza, se deben etiquetar las bolsas de residuos según su contenido y completar las hojas de datos.

Procesamiento de los datos:

Se cuantifica el peso de las bolsas, sacos o recipientes con los residuos recolectados, se resguardan las hojas con datos obtenidos, posteriormente se digitaliza la información, se analizan los datos resultados y se comparte la información obtenida.

Evidencias:

Antes se debe asignar una persona para la toma de fotografías y videos. Durante la limpieza, es importante tomar fotos y videos del proceso de limpieza. Después del evento, compartir las evidencias con los diferentes actores que participaron en la limpieza y público en general.

Conclusiones y/o recomendaciones

- Las instituciones de gobierno nacional o gobiernos locales no cuentan con una base de datos de las organizaciones y personas que realizan limpiezas de espacios públicos, ni una relacionada que sea de acceso público.
- La mayoría de las organizaciones y personas que realizan limpiezas de espacios públicos no cuentan o no utilizan una guía para el desarrollo de la actividad. Esta situación genera deficiencias en la seguridad de la limpieza, en el buen manejo de los residuos recolectados y en el impacto ambiental y político de la actividad.
- Algunas de las organizaciones que realizan limpiezas de espacios públicos no tienen dentro de su estrategia la recolección de datos, lo que da como resultado un vacío de información para la toma de decisiones en políticas públicas, asimismo, no queda evidencia de los esfuerzos realizados.
- No se cuenta con una metodología nacional que defina cómo y cuál información es necesaria recopilar en las limpiezas de espacios públicos. Los datos obtenidos por las organizaciones pueden no ser de relevancia a nivel nacional, debido a que esta podría no ser la información que instituciones gubernamentales requieren.
- En el país no se cuenta con una plataforma digital, donde las organizaciones y personas que realizan las limpiezas de espacios públicos puedan registrarse como organizadores de estos eventos y también puedan compartir los datos obtenidos en estas actividades. Esto dificulta llevar un registro de las ONGs y personas que realizan estas limpiezas, la cantidad de eventos que se realizan al año y demás datos de estas actividades.

Referencias

- [1] B. S. Koch and M. M. Barber, "Basuras marinas; impacto, actualidad y las acciones para mitigar sus consecuencias," Revista Marina, No. 968, vol. 968, pp. 30–39, 2019. [Online]. Available: <https://revistamarina.cl/revistas/2019/1/bschmidt-k-mmanleyb.pdf>.
- [2] S. Werner, A. Budziak, J. Van Franeker, F. Galgani, G. Hanke, T. Maes, M. Matiddi, P. Nilsson, L. Oosterbaan, E. Priestland, R. Thompson, J. Veiga, and T. Vlachogianni, "Harm caused by marine litter," 2016, doi: 10.2788/19937.
- [3] Ministerio de Salud, "Plan Nacional de Residuos Marinos 2021-2030," Costa Rica, 2021.
- [4] Instituto de Investigación de Ciencias Económicas, "Informe Final: Impacto económico al impuesto al plástico," 2019.
- [5] J. Burger, M. Gochfeld, T. Pittfield, and C. Jeitner, "Perceptions of climate change, sea level rise, and possible consequences relate mainly to self-valuation of science knowledge," Energy and Power Engineering, vol. 8, no. 5, pp. 250–262, 2016, doi: 10.4236/epe.2016.85024.
- [6] X. I. Loizidou, D. L. Orthodoxou, M. I. Loizides, and Y. N. Krestenitis, "A community-based approach for site-specific policies and solutions on marine litter: The example of Paphos, Cyprus," Environmental System Decision, vol. 41, no. 1, pp. 33–44, 2020, doi: 10.1007/s10669-020-09786-9.
- [7] S. Rech, V. Macaya-Caquipán, J. F. Pantoja, M. M. Rivadeneira, D. Jofre Madariaga, and M. Thiel, "Rivers as a source of marine litter - A study from the SE Pacific," Marine Pollution Bulletin, vol. 82, no. 1–2, pp. 66–75, 2014, doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.03.019.
- [8] M. Thiel, I. A. Hinojosa, L. Miranda, J. F. Pantoja, M. M. Rivadeneira, and N. Vásquez, "Anthropogenic marine debris in the coastal environment: A multi-year comparison between coastal waters and local shores," Marine Pollution Bulletin, vol. 71, no. 1–2, pp. 307–316, 2013, doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.01.005.
- [9] P. Dauvergne, "Why is the global governance of plastic failing the oceans?," Global Environmental Change, vol. 51, pp. 22–31, 2018, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2018.05.002.
- [10] World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company, "The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics," 2016.

- [11] L. C. M. Lebreton, J. Van Der Zwet, J. W. Damsteeg, B. Slat, A. Andrade, and J. Reisser, "River plastic emissions to the world's oceans," *Nature Communications*, vol. 8, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1038/ncomms15611.
- [12] H. S. Carson, M. R. Lamson, D. Nakashima, D. Toloumu, J. Hafner, N. Maximenko, and K. J. McDermid, "Tracking the sources and sinks of local marine debris in Hawai'i," *Mar. Environ. Res.*, vol. 84, pp. 76–83, 2013, doi: 10.1016/j.marenvres.2012.12.002.
- [13] A. T. Williams and S. L. Simmons, "Estuarine litter at the river/beach interface in the Bristol Channel, United Kingdom," *Journal of Coastal Research*, vol. 13, no. 4, pp. 1159–1165, 1997, doi: 10.1016/S0967-0653(98)80599-1.
- [14] C. J. Moore, G. L. Lattin, and A. F. Zellers, "Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of Southern California," *Revista Gestão Costeira Integrada*, vol. 11, no. 1, pp. 65–73, 2011, doi: 10.5894/rgci194.
- [15] A. Lechner, H. Keckeis, F. Lumesberger-Loisl, B. Zens, R. Krusch, M. Tritthart, M. Glas, and E. Schludermann, "The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river," *Environmental Pollution*, vol. 188, pp. 177–181, 2014, doi: 10.1016/j.envpol.2014.02.006.
- [16] A. T. Williams and S. L. Simmons, "Sources of riverine litter: The river Taff, South Wales, UK," *Water Air Soil Pollut.*, vol. 112, no. 1–2, pp. 197–216, 1999, doi: 10.1023/A:1005000724803.
- [17] V. Hidalgo-Ruz, D. Honorato, and M. Gatta-Rosemary, "Spatio-temporal variation of anthropogenic marine debris on Chilean beaches," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 126, pp. 516–524, 2018, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.014.
- [18] S. S. Sadri and R. C. Thompson, "On the quantity and composition of floating plastic debris entering and leaving the Tamar Estuary, Southwest England," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 81, no. 1, pp. 55–60, 2014, doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.02.020.
- [19] A. Karami, A. Golieskardi, C. Keong Choo, V. Larat, T. S. Galloway, and B. Salamatinia, "The presence of microplastics in commercial salts from different countries," *Scientific reports*, vol. 7, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1038/srep46173.
- [20] S. L. Wright and F. J. Kelly, "Plastic and human health: A micro issue?," *Environmental science & technology*, vol. 51, no. 12, pp. 6634–6647, 2017, doi: 10.1021/acs.est.7b00423.
- [21] B. Tabuenca, M. Kalz, and A. Löhr, "Massive open online education for environmental activism: The worldwide problem of marine litter," *Sustainability*, vol. 11, no. 10, 2019, doi: 10.3390/su11102860.
- [22] P. Villarrubia-Gómez, S. E. Cornell, and J. Fabres, "Marine plastic pollution as a planetary boundary threat – The drifting piece in the sustainability puzzle," *Marine policy*, vol. 96, pp. 213–220, 2018, doi: 10.1016/j.marpol.2017.11.035.
- [23] L. F. Túmbez, and J. M. Ulloa, "Estrategias innovadoras en la comprensión lectora para el mejoramiento del rendimiento escolar en los niños y niñas del cuarto año de educación básica de la Unidad Educativa 'Dr. Néstor Mogollón López,' de la Parroquia Matriz del Cantón La Maná, durante el año lectivo 2016- 2017," Universidad Técnica de Cotopaxi, 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4689>
- [24] F. Galgani, "Marine litter within the European Marine Strategy Framework Directive," *Marine Productivity: Perturbations Resilience Socio-ecosystems*, pp. 1–16, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-13878-7_1.
- [25] R. Andrade, and J. C. Piñar, "Estrategia Nacional para la sustitución de plásticos de un solo uso por alternativas renovables y compostables," 2017.
- [26] Ministerio de Salud, "Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021," 2016. [Online]. Available: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos/sobre-el-ministerio/politicas-y-planes-en-salud/planes-en-salud/3025-plan-nacional-para-la-gestion-integral-de-residuos-2016-2021/file>.
- [27] A. Y. Saravia-Arguedas, G. M. Lugioyo, A. Suárez Serrano, A. Guillén Watson, and L. Sierra Sierra, "Fuentes terrestres de contaminación que impactan la zona marino-costera del Golfo de Papagayo, Costa Rica," *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, vol. 11, no. 2, pp. 59–74, 2019, doi: 10.15359/revmar.11-2.4.
- [28] M. de los Á. Socas González, "Contaminación por residuos: Islas de plástico," Universidad de La Laguna, 2018. [Online]. Available: <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/13438>
- [29] V. García, J. Acuña, J. A. Vargas-Zamora, and J. García-Céspedes, "Calidad bacteriológica y desechos sólidos en cinco ambientes costeros de Costa Rica," *Revista de Biología Tropical*, vol. 54, no. 1, pp. 35–48, 2006, doi: 10.15517/rbt.v54i1.26828.
- [30] N. Sanchez, C. Jiménez, and J. Cortes, "Desarrollo costero y ambientes marino-costeros en Bahía Culebra, Guanacaste, Costa Rica," 2018. [Online]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/33301/32797>.

- [31] M. Peña, "Expertos analizan el manejo de la basura en Costa Rica," Universidad de Costa Rica, 2011. [Online]. Available: <https://www.ucr.ac.cr/noticias>.
- [32] C. Doria, and L. J. Vivas, "Fuentes terrestres de contaminación en la zona costera de La Guajira, Colombia," Revista Investigación Agraria y Ambiental, vol. 7, pp. 123–138, 2016. [Online]. Available: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1539/1863>.
- [33] Consejo Nacional de Rectores, "Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2019," San José, 2019. [Online]. Available: <https://estadonacion.or.cr/informe/?id=5f2e98c1-f88c-4f51-a151-475c342583ed>.
- [34] O. Aragón, P. Colque, and B. Rosales, "Estrategia Local de adaptación al cambio climático en zonas marinas y costeras del Caribe Sur de Costa Rica," Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2012. . [Online]. Available: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1718>
- [35] B. Rengifo, L. Quitaquéz, and F. Mora, "La educación ambiental una estrategia pedagógica que contribuye a la solución de la problemática ambiental en Colombia," 2012.
- [36] E. Verdejo, S. Albein, A. Lázaro, J. Ruiz, M. Del Saz, R. Beiras, S. López, E. Ferrer, E. López, R. Rodríguez, and F. J. Miranda, "Valorización material de residuos plásticos recuperados caracterización, aplicaciones y desarrollo de productos," 2015, pp. 1–11.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.

Valorización del residuo agroindustrial del tabaco (*Nicotina Tabacum L.*), utilizándolo en mezclas con pulpa celulósica reciclada, de papel de oficina y diario, para la elaboración de productos moldeados

Valorization of Agroindustrial Waste from Tobacco (*Nicotina Tabacum L.*), Using it in Mixtures with Recycled Cellulosic Pulp, Office and Newspaper Paper for the Preparation of Molded Products

Eyra María Albarrán-Molina¹, Israel Quintero²

Fecha de recepción: 16 de marzo, 2024

Fecha de aprobación: 23 de setiembre, 2024

Albarrán-Molina, E.M; Quintero, I. Valorización del residuo agroindustrial del tabaco (*Nicotina Tabacum L.*), utilizándolo en mezclas con pulpa celulósica reciclada, de papel de oficina y diario, para la elaboración de productos moldeados. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 2. Abril-Junio, 2025. Pág. 152-169.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i2.7005>

¹ Ingeniero forestal, Msc. Profesor. Investigador, Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela.

 feyramam8@gmail.com ; eyramam_8@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-7120-8349>

² Estudiante de Pregrado de la Universidad de los Andes-Venezuela

Palabras clave

Residuo agroindustrial; tabaco; celulosa, hemicelulosa; lignina; productos moldeados; reciclado de papel.

Resumen

La biomasa lignocelulósica se refiere a los materiales orgánicos provenientes de plantas y árboles que contienen celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales están firmemente entrelazados y unidos químicamente en sus paredes celulares. Además, estos materiales pueden contener otros compuestos como extractivos y materiales extraños. La celulosa, hemicelulosa y lignina también son los principales componentes de las fibras naturales, que provienen de diversos recursos como madera, fibras recicladas y desechos de biomasa agrícola como la paja de canola, trigo, arroz y cáñamo. Estas fibras se utilizan principalmente para la fabricación de productos de pulpa moldeada. La celulosa del tabaco tiene propiedades similares a las de otras fuentes de celulosa, como la madera, y se puede utilizar para producir papel y otros productos basados en celulosa.

El material fibroso empleado en este estudio proviene de residuos agroindustriales del tabaco (*Nicotina tabacum* L.), los cuales fueron mezclados con pulpa celulósica reciclada, de papel de oficina y diario, para la elaboración de los productos moldeables. Para transformar los residuos de tabaco a partículas se empleó el molino de martillo de marca: CONDUX-WERK Wolfgang bei Hanau y modelo: LHM 20/16. Con un motor de: 1,5 Kilowatts / 2.01 HP Caballos de Fuerza Mecánicos, 380 V, 2820 rpm, 0.88 Cos Phi y 50 Hz. Los factores seleccionados para el diseño experimental de este estudio fueron los diferentes tipos de papel utilizados en la mezcla: papel de diario (papel periódico), papel de oficina y tabaco y dicho diseño experimental se realizó mediante el software de simulación Statgraphics. La preparación y caracterización de la materia prima (el tabaco, *Nicotiana tabacum* L.) se llevó a cabo mediante las normas Technical Report NREL/TP-510-42620; en donde fueron pesadas 70 gr de cada muestra y luego procesadas mediante el molino de cuchillas; dichas muestras fueron tamizadas en un conjunto de tamices apilados, donde el superior de malla 20 y el inferior de malla 80. Así pues, para la determinación de humedad de esta biomasa, así como para la determinación de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa, se emplearon también las normas establecidas en el Technical Report NREL/TP-510-42620, y para la determinación de extractivos en la biomasa, se emplearon las normas establecidas en el Technical Report NREL/TP-510-42619. Para la preparación de las fibras de tabaco, se utilizó un refinador de disco, marca THE BAUER BROS. CO y modelo: 148-2, velocidad 2890 rpm. Para la formación de los moldes, se empleó un equipo moldeador y se realizaron los ensayos correspondientes de acuerdo a la norma TAPPI T 402 sp-98 "Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products". En general, los resultados indican que la muestra de biomasa del tabaco (*Nicotina tabacum* L.) tiene un alto contenido de celulosa y hemicelulosa (glucano y xilano), así como un contenido significativo de lignina; siendo el contenido promedio de celulosa 32,61%, mientras que la hemicelulosa 17,97% y la lignina representa el 20,71% de la composición de la pared celular; y un contenido del 13,58% de extractivos y del 10,11% de componentes inorgánicos.

Keywords

Agroindustrial waste; tobacco; cellulose; hemicellulose; lignin; molded products; paper recycling.

Abstract

Lignocellulosic biomass refers to organic materials from plants and trees that contain cellulose, hemicellulose and lignin, which are firmly intertwined and chemically bonded in their cell walls. Additionally, these materials may contain other compounds such as extractives and foreign materials. Cellulose, hemicellulose and lignin are also the main components of natural fibers, which come from various resources such as wood, recycled fibers and agricultural biomass waste such as canola, wheat, rice and hemp straw. These fibers are mainly used for the manufacture of molded pulp products. Tobacco cellulose has similar properties to other cellulose sources, such as wood, and can be used to produce paper and other cellulose-based products.

The fibrous material used in this study comes from agroindustrial tobacco waste (*Nicotina tabacum L.*), which was mixed with recycled cellulose pulp, from office and newspaper paper, for the production of moldable products. To transform the tobacco waste into particles, the hammer mill brand: CONDUX-WERK Wolfgang bei Hanau and model: LHM 20/16 was used. With a motor of: 1.5 Kilowatts / 2.01 HP Mechanical Horsepower, 380 V, 2820 rpm, 0.88 Cos Phi and 50 Hz. The factors selected for the experimental design of this study were the different types of paper used in the mixture: newsprint, office paper and tobacco, and said experimental design was carried out using the Statgraphics simulation software. The preparation and characterization of the raw material (tobacco, *Nicotiana tabacum L.*) was carried out using the Technical Report NREL/TP-510-42620 standards; where 70 g of each sample were weighed and then processed using the knife mill; These samples were sieved on a set of stacked sieves, where the upper one was 20 mesh and the lower one was 80 mesh. Thus, for the determination of moisture in this biomass, as well as for the determination of structural carbohydrates and lignin in biomass, the standards established in the Technical Report NREL/TP-510-42620 were also used, and for the determination of extractives in biomass, the standards established in the Technical Report NREL/TP-510-42619 were used. To prepare the tobacco fibers, a disc refiner, THE BAUEP BROS brand, was used. CO and model: 148-2, speed 2890 rpm. For the formation of the molds, a molding equipment was used and the corresponding tests were carried out according to the TAPPI T 402 sp-98 standard "Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products". In general, the results indicate that the tobacco (*Nicotina tabacum L.*) biomass sample has a high content of cellulose and hemicellulose (glucan and xylans), as well as a significant content of lignin; the average cellulose content being 32.61%, while hemicellulose 17.97% and lignin represents 20.71% of the cell wall composition; and a content of 13.58% of extractives and 10.11% of inorganic components.

Introducción

El aumento en la demanda de producción de alimentos ha implicado un aumento en la generación de subproductos o residuos agroindustriales [1], lo cual supone una problemática a nivel mundial [2]. Sin embargo, los residuos agroindustriales poseen un alto potencial para ser aprovechados como materia prima en diferentes procesos [3]. Pudiendo ser empleados en la elaboración de un producto con valor agregado, como el papel, cartón u otros materiales [4].

En los últimos años, ha aumentado el interés en el uso de residuos agrícolas [5] como fuentes alternativas de materias primas para la producción de pulpa y papel [6], provenientes de productos no maderables, debido a sus propiedades aceptables [7].

Está comprobado que los residuos agroindustriales son fuentes importantes de materia prima fibrosa [8], que pueden ser mezclados con otros materiales, como fibras recicladas, para obtener un producto de valor agregado [9].

En la agroindustria del tabaco (*Nicotina tabacum* L.), se pueden encontrar grandes cantidades de residuos [10], incluyendo hojas, tallos y restos de producción [11]. La cantidad de residuos generados por la industria tabacalera es considerable, y su disposición adecuada representa un reto ambiental importante [12].

El tabaco es una hoja de la planta *Nicotiana tabacum* L [13], que se utiliza principalmente para fumar, masticar o inhalar [14]. La composición del tabaco varía según su origen y procesamiento, pero en general contiene entre un 90% y un 95% de celulosa, hemicelulosa y lignina [15], y entre un 5% y un 10% de compuestos diversos como la nicotina, el alquitrán y los productos de combustión [16].

El proceso de producción del papel a partir de la celulosa del tabaco ha sido estudiado por varios investigadores [17]. De manera que, se puede obtener pulpa de tabaco a partir de hojas secas y trituradas [16]. La celulosa del tabaco tiene propiedades similares a las de otras fuentes de celulosa, como la madera [18], y se puede utilizar para producir papel y otros productos basados en celulosa [3].

El tallo del tabaco es una parte importante de la planta [19], ya que es donde se concentra la mayor cantidad de celulosa que puede ser aprovechada para la fabricación de papel [20]. Según estudios, el tallo del tabaco es una fuente abundante de celulosa [21], que puede ser extraída mediante procesos de pulpa y papel convencionales [17].

También, estas fibras de celulosa presentan características similares a las de la madera [22], y pueden ser utilizadas como materia prima para la producción de distintos tipos de papel, cartón y otros productos de celulosa [23]. Por lo tanto, se propone en este estudio, la valorización del residuo agroindustrial del tabaco para su uso en mezclas con pulpa celulósica reciclada de oficina y diario (periódico), para la elaboración de productos moldeados, manteniendo las propiedades físicas óptimas de los moldes.

Esta tecnología es factible de implementar y se utiliza en diferentes áreas, como envases, tecnología de aplicaciones médicas [24], y en la fabricación de diferentes productos moldeados, como bandejas para huevos, platos y contenedores de alimentos, macetas germinadoras, recipientes hospitalarios descartables, embalajes contenedores y protectores de lámparas, entre otros [25].

Por tanto, este trabajo se fundamenta en realizar la valoración del residuo agroindustrial del tabaco, utilizándolo en mezclas con pulpas celulósicas recicladas, para la elaboración de productos moldeados, manteniendo las propiedades físicas óptimas de los moldes.

Metodología

Materiales

El material utilizado es una mezcla de residuos de la planta *Nicotiana tabacum* L. (Tabaco), papel de diario (papel periódico), papel de oficina.

Métodos

Diseño experimental

El diseño experimental se realizó mediante el software de simulación Statgraphics. Se generaron cuatro puntos experimentales, cada uno con una combinación diferente de los factores seleccionados, expresado en el cuadro 1, se estimó un total de 40 moldes por puntos.

Cuadro 1. Diseño experimental

Punto	Diario	Oficina	Tabaco
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0.6	0	0.4
4	0	0.6	0.4

Materia prima requerida

Para determinar la cantidad de materia prima necesaria para la fabricación de moldes, se estableció como masa óptima para cada molde, nueve (9) gramos para producir cuarenta (40) moldes para cada punto experimental. Esto se realizó con el fin de asegurar la homogeneidad y la exactitud de los resultados obtenidos, eliminando la posible influencia de factores externos [26].

El diseño experimental incluyó cuatro (4) puntos diferentes, y para determinar la cantidad de materia prima requerida se calculó la suma total de cada corrida de materia prima, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Masa para 40 moldes} = 40 \text{ Molde} \times \frac{\text{Masa del Molde (g)}}{1 \text{ Molde}}$$

$$\text{Materia Prima Requerida} = \text{Masa para 40 Moldes} \times \sum \text{total de las corridas}$$

Obtención de la materia prima

Tabaco

Se seleccionó el material a procesar: residuos de la planta *Nicotiana tabacum* L. (Tabaco), libre de impurezas como clavos, grapas, tornillos, entre otros, se procedió a realizar cortes longitudinales y transversales a los tallos de *Nicotiana tabacum* L., con la finalidad de facilitar su posterior procesamiento [27].

Para la transformación de los residuos de tabaco a partículas, se empleó el molino de martillo, de marca: CONDUX-WERK Wolfgang bei Hanau y modelo: LHM 20/16. Con un motor de: 1,5 Kilowatts / 2.01 HP Caballos de Fuerza Mecánicos, 380 V, 2820 rpm, 0.88 Cos Phi y 50 Hz [28]. Compuesto por un rotor, formado por un eje principal y un conjunto de martillos que giran a gran velocidad golpeando la materia prima hasta tritúrala en partículas de menor tamaño [29].

Caracterización de la materia prima (tabaco)

Preparación de la materia prima

En esta etapa del trabajo, se utilizaron las normas establecidas en el Technical Report NREL/TP-510-42620 [30], para la preparación de la materia prima. La materia prima utilizada fue el tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). Se pesó aproximadamente 70 gramos de cada muestra y fueron procesadas en un molino de cuchillas por lotes continuos. La muestra fue tamizada en un conjunto de tamices apilados, siendo el superior de malla 20 y el inferior de malla 80.

Determinación de sequedad de la materia prima molida

Para determinar la humedad de la biomasa molida, se utilizaron las normas establecidas en el Technical Report NREL/TP-510-42620 [30], se tomó una porción de cada fracción obtenida a través del tamizado. Se limpió y se secó en una estufa a 105°C durante aproximadamente 4 horas un pesafiltro, en él se colocó una porción de la muestra correspondiente y se llevó al horno por aproximadamente 12 horas. Posteriormente, se llevó al desecador hasta que alcanzara la temperatura ambiente y se pesó nuevamente en una balanza analítica. La humedad se determinó utilizando la siguiente ecuación específica:

$$\% \text{ Sequedad} = \frac{\text{Peso muestra seca (g)}}{\text{Peso muestra húmeda (g)}} * 100$$

Determinación de extractivos en biomasa

En este estudio se llevó a cabo la determinación de extractivos en la biomasa utilizando las normas establecidas en el Technical Report NREL/TP-510-42619 [31].

Se utilizaron 2 matraces de ebullición y 2 cartuchos Soxhlet. Los matraces se secaron en una estufa a 105°C por aproximadamente 12 horas antes de añadir piedras de ebullición y 15 ml de alcohol etílico al 96% en cada matraz. Se prepararon los cartuchos Soxhlet con muestras de la biomasa molida retenida en malla 80, previamente secada en una estufa a 105°C por aproximadamente 12 horas. Los equipos Soxhlet se ensamblaron y se dejaron sifonando durante 12 horas, transfiriendo todo el alcohol de cada equipo a su respectivo matraz de ebullición. Cada matraz con su contenido y cada cartucho se llevaron a la estufa a 105°C durante un mínimo de 12 horas hasta que quedaron completamente secos. Luego se llevaron al desecador hasta que alcanzaron la temperatura ambiente, se pesaron y se calculó el porcentaje de extractivos en alcohol utilizando la siguiente ecuación específica:

$$\% \text{ Extractivos en alcohol} = \frac{\text{Masa seca extraída (g)}}{\text{Masa seca sin extraer (g)}} * 100$$

Muestras para la determinación de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa

Se utilizaron las recomendaciones establecidas en el Technical Report NREL/TP-510-42620 [30], después de extraer las muestras de los cartuchos de celulosa de la estufa, se reunieron y almacenaron para su posterior utilización en la determinación de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa.

Determinación de sequedad de las muestras para la valorización de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa

Para la determinación de carbohidratos estructurales y lignina en la biomasa, se utilizaron las indicaciones establecidas en el Technical Report NREL/TP-510-42620 [30], se recolectó una porción de la muestra y se realizó la determinación de sequedad. Posteriormente, se pesó en una balanza analítica y se introdujo una porción de la muestra en un pesafiltro. Luego, se llevó al horno a 105 °C por aproximadamente 12 horas, se llevó al desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y se pesó nuevamente en una balanza analítica. La humedad se determinó utilizando la ecuación indicada anteriormente.

Determinación de carbohidratos estructurales y lignina en biomasa

Hidrólisis

Se emplearon las normas establecidas en el Technical Report NREL/TP-510-42618. Se utilizaron dos tubos de hidrólisis que se fueron previamente secados en la estufa a 105°C durante aproximadamente 12 horas y se agregó a cada tubo una muestra de la biomasa descrita anteriormente y 10 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) al 72% (con una densidad de 1,63 g/mL) y se aplicó vacío en cada muestra durante 5 minutos en 3 ciclos. La hidrólisis se completó después de 60 minutos. Se transfirió cuantitativamente la mezcla (muestra + ácido sulfúrico) a dos frascos previamente tarados. La mezcla se diluyó con agua destilada para obtener una solución al 4% con una masa de 293,4 g, y se determinó utilizando la siguiente ecuación específica:

$$\text{Si, } C_1 * m_1 = C_2 * m_2; \text{ entonces, } m_2 = \frac{C_1 * m_1}{C_2}$$

$$\text{Y si, } m_1 = \delta_1 * v_1; \text{ entonces, } m_2 = \frac{C_1 * \delta_1 * v_1}{C_2}$$

Dónde: C = concentración; m = masa; δ = densidad y v = volumen

$$\text{De esta manera } m_2 = \frac{72\% * 1,63 \frac{g}{ml} * 10 ml}{4\%} = 293.4 g$$

Después de diluir las muestras y transferirlas a frascos, se cerraron herméticamente y se agitaron para evitar la separación de fases [32]. Los frascos se colocaron en un auto clave, cuando se alcanzaron los 100°C o 0.5 bar, se cerró la válvula y se midió el tiempo que tardó en alcanzar los 121°C. Una vez que se alcanzó este punto, se dejó durante una hora antes de apagar la autoclave. Cuando se alcanzó nuevamente los 0.5 bar, se abrió la válvula y se dejó enfriar antes de retirar los frascos.

Filtración de residuo sólido (lignina insoluble o Klason)

Para la determinación de lignina, se empleó la Technical Report NREL/TP-510-42618 [33], se identificaron y se pesaron todos los elementos antes de armar el equipo de filtrado (Kitasato + embudo + filtro). El contenido de los frascos se filtró primero por gravedad con ayuda de una varilla de vidrio sobre el filtro, y luego se realizó un filtrado con vacío. Finalmente, se llenaron dos recipientes plásticos con el filtrado identificados y guardados para la determinación de lignina soluble. Se determinó el volumen necesario en mililitros para analizar la lignina soluble utilizando la ecuación siguiente:

$$\text{Volumen necesario para lignina soluble (ml)} = \frac{\text{Masa del filtrado (g)}}{\text{Densidad del ácido al 4\% (g/ml)}}$$

Corrección por cenizas

Mediante indicaciones de la Technical Report NREL/TP-510-42618 [33], se secaron los filtros con el material sólido en la estufa por un mínimo de 6 horas y se retiraron. Se retiraron dos crisoles de la estufa, previamente secados a 105°C durante 4 horas, se colocaron en el desecador, se identificaron y se pesaron. Se colocó una muestra de la materia prima molida retenida en malla 80 en cada crisol y se tomó la masa de cada uno.

Los filtros con el material sólido y los crisoles con las muestras se llevaron a una Mufla con dos rampas de temperatura, la primera de temperatura ambiente a 350°C en 10 minutos y se mantuvo a esa temperatura por 30 minutos. La segunda rampa fue de 350°C a 550°C en 20 minutos, y luego se mantuvo en 550°C durante 3 horas. Se determinó el porcentaje de ceniza en el residuo soluble y el porcentaje de lignina insoluble mediante las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ residuo insoluble} = \frac{\text{Masa del residuo sólido seco (g)}}{\text{Masa de la muestra seca (g)}} * 100$$

$$\% \text{ lignina insoluble} = \frac{\text{Masa de lignina (g)}}{\text{Masa de la muestra seca (g)}} * 100$$

Lignina soluble

Se analizó de acuerdo a la norma Technical Report NREL/TP-510-42620 [30], el filtrado para la determinación de la lignina soluble fue diluido a un factor de dilución de 5, agregando 5 ml de filtrado con 20 ml de agua destilada en un matraz de 25 ml. La cubeta se situó en el Espectrofotómetro UV y se midió la absorbancia a la longitud de onda especificada en la norma NREL/TP-510-42618, para Tabaco NIST SRM 8493, que es de 240 nm y con una absorvidad de 25 L/g*cm. El porcentaje de lignina soluble se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Lignina Soluble (\%)} = \frac{\text{Abs} \times \text{D} \times \text{Vfiltrado (L)}}{\epsilon} * 100$$

Dónde: Abs = absorbancia obtenida, ϵ = absorvidad de biomasa a la longitud de onda medida, D = factor de dilución, VFiltrado = Volumen filtrado en litros.

Lignina total

Se calculó la cantidad total de lignina, sumando la lignina soluble y la lignina insoluble halladas, de acuerdo con la norma Technical Report NREL/TP-510-42620 [30], previamente, y se realizó una corrección adicional con los cálculos de los extractivos en alcohol, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Lignina total corregida} = \text{Lsol(sme)} + \text{Linsol(sme)} * \frac{100 - \text{Ext}}{100}$$

Dónde: Lsol (sme) = Lignina soluble sobre materia prima extraída, Linsol (sme) = Lignina insoluble sobre materia prima y Ext = Extractivos.

Carbohidratos totales

Para cuantificar los carbohidratos, se usó la norma de Technical Report NREL/TP-510-42620 [30], donde se utilizó cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) con una columna de intercambio iónico. Se determinó la cantidad extraída de celulosas expresadas en glucosa y de hemicelulosas expresadas en xilosa, glucosa, manosa y arabinosa, así como también la cantidad de ácido acético expresado en forma de acetilos.

Preparación de las fibras de tabaco (refino)

Se utilizó un refinador de disco, de marca THE BAUEP BROS. CO y modelo: 148-2. De velocidad de, 2890 rpm. Se depositó la pulpa celulósica de tabaco en un tamiz, drenando el agua y eliminando los finos de la materia prima. Se procedió a centrifugar la pulpa celulósica de tabaco, para eliminar el agua en exceso, luego se colocó en una batidora industrial para mezclarla y homogeneizarla, finalmente se almacenó en bolsas de polietileno negras, con la finalidad de mantener la humedad constante, se guardó en el refrigerador para conservarla y evitar su degradación [34].

Preparación de la celulosa reciclada

Se utilizó papel de diario (periódico) y de oficina para la producción de celulosa reciclada. Para la selección del papel de oficina, se eliminaron las impurezas como grapas, adhesivos y clips para obtener una materia prima limpia para el procesamiento en hidropulper. En primera instancia, para el proceso, se procedió a cortar el papel de oficina y diario (papel periódico) en dimensiones apropiadas que previenen la sobrecarga del hidrapulper [35]. Se llevaron a cabo dos procesos de hidropulpa para cada materia prima (diario y oficina) con una consistencia del 6%. Para ello, se dividió la cantidad de materia prima en dos partes y se calculó la cantidad de agua necesaria para cada hidropulpado utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Materia prima a añadir en el hidro pulper (g)} = \frac{\text{Materia prima g}}{2}$$

$$\text{Materia prima a añadir en el hidro pulper g} \times \frac{1L \text{ (agua)}}{60 \text{ g (papel)}} = \text{Agua a añadir}$$

Fabricación de los moldes

Preparación de la solución

Para la formación de los moldes, se empleó un equipo moldeador. Se preparó la solución específica correspondiente al punto deseado, de acuerdo al diseño experimental establecido. Para preparar dicha solución, se calculó la cantidad de pulpa necesaria para que, a una consistencia de 0,5, fuera suficiente para un recipiente de plástico de sesenta (60) litros, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Gramos de pulpa que entran en el recipiente}$$

$$= \text{Volumen del recipiente ml} \times \frac{0.5 \text{ g pulpa}}{100 \text{ ml}}$$

Se agregó agua al recipiente y se añadieron inmediatamente los gramos de pulpa calculados, se agitó la mezcla utilizando un agitador eléctrico a una velocidad de 71 rps durante 15 minutos. Luego, se tomó una muestra representativa de la solución para determinar su consistencia. Se pesó una hoja formada a partir de esta muestra y se colocó en una balanza halógena para obtener su peso seco. Se calculó la consistencia de la solución utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Consistencia de la solución} = 100 \times \frac{\text{Peso de la solución}}{\text{Peso seco de la hoja}}$$

Formación de los moldes

Después de agitar la solución en el recipiente a una velocidad de 41 rps para obtener una mezcla homogénea, se procedió a formar los moldes mediante la máquina moldeadora. Dicha máquina consta de dos piezas: una hembra y un macho, y cuenta con dos fases, succión y aire, tratando de imitar el proceso industrial [34].

En primer lugar, se sumergió la hembra en fase de succión en la solución durante diez (10) segundos y se levantó durante quince (15) segundos para eliminar el exceso de agua. Inmediatamente, se insertó el macho colocándolo en fase de succión y se aplicó aire a la hembra para permitir que el molde se adhiriera al macho. Posteriormente, se cortó la succión y se aplicó aire para liberar el molde. Se rotularon cuatro (4) bancos con los siguientes códigos: A 1, 2, 3 y 4 en frente y lateral 1, 2 y 3; B 1, 2, 3 y 4 en frente y lateral 1, 2 y 3; C 1, 2, 3 y 4 en frente y lateral 1, 2 y 3; y D 1, 2, 3 y 4 en frente y lateral 1, 2 y 3. Estos bancos contaban con una malla para permitir la ventilación de los moldes y mantenerlos secos. Posteriormente, los moldes se dejaron reposar durante 24 horas en una sala de acondicionamiento para permitir su medición, pesaje y ensayo luego de estar secos al aire [36].

Ensayos

Para acondicionar, se siguió la norma TAPPI T 402 sp-98 "Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products" (Technical Association of the Pulp and PaperIndustry, 2001) [37]. Una vez que los moldes estuvieron debidamente acondicionados, se procedió a pesarlos utilizando una balanza analítica y a medir el espesor de la pared con un vernier digital, así como el área del molde y se calcula el área, el gramaje, el espesor de la pared, la densidad aparente y el volumen de la pared.

Área

Fue realizado mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Área (cm}^2\text{)} = \left(\frac{B + b}{2} \times h\right) + (b^2)$$

Dónde: B= Base mayor b=base menor h=altura

Espesor de la pared

Se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Espesor (mm)} = \frac{\text{Promedio de los Espesores (mm)}}{\text{Número de caras medida}}$$

Gramaje

El gramaje de los moldes se calculó según la norma TAPPI T 410 om-98 "Grammage of paper and paperboard" (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001). Se realizó el cálculo correspondiente para determinar gramaje con la siguiente ecuación:

$$\text{Gramaje} \left(\frac{g}{cm^2} \right) = \frac{\text{Promedio de la mada de los moldes (g)}}{\text{Área (cm}^2\text{)}}$$

Densidad aparente

La densidad aparente de los moldes se realizó mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Densidad aparente} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{Gramaje} \left(\frac{g}{m^2} \right)}{\text{Espesor (mm)}} \times \left(\frac{1mm}{0.1cm} \right)$$

Volumen de la pared

El volumen de la pared de los moldes, determinó según la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Volumen de la pared de los moldes(cm}^3\text{)} \\ = \text{Área(cm}^2\text{)} \times \left(\text{Espesor(mm)} \times \frac{1(cm)}{10(mm)} \right) \end{aligned}$$

Compresión

Se realizó una previa preparación de la máquina de compresión de 5 kilo Newton, para realizar este ensayo, se empleó la norma TAPPI T 494 om-88 "Tensile properties of paper and paperboard" (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2001) [38]. Utilizando una máquina de ensayo universal de tracción y compresión. Se aplicó una carga continua de cinco (5) kilo Newton a una velocidad constante de 10 milímetros por minuto hasta que la muestra sea comprimida hasta un 70% de su espesor original. Se midió la fuerza aplicada y se registró el punto de fractura de la muestra.

Resultados

Composición química del tabaco (*Nicotina tabacum L.*)

El cuadro 2, muestra la composición química del Tabaco (*Nicotina tabacum L.*), donde se especifica la cantidad de carbohidratos presentes en la materia prima: las celulosas expresadas en glucanos; hemicelulosas expresadas en xilanos, arabinanos; el ácido acético expresado en acetilos; y los inorgánicos en cenizas. Además, se muestra la cantidad total de lignina presente, y los extractivos en alcohol.

Cuadro 2. Composición química de la pared celular del tabaco (*Nicotina tabacum* L.)

	Glucano	Xilanos	Arabizamos	Acetilos	Lignina	Extractivos en alcohol	Cenizas
Promedio (%)	32,61	16,92	1,05	3,04	20,71	13,58	10,11

En el cuadro anterior, se puede observar un valor promedio de Glucano de 32,61%. El glucano es un polisacárido que se encuentra en la celulosa, que es el componente principal de la pared celular de las plantas [39]. Un alto contenido de glucano indica un alto contenido de celulosa en la muestra [40]. Asimismo, muestra el valor promedio de Xilanos 16,92% y Arabinanos 1,05%; los xilanos y arabinanos son dos polisacáridos que se encuentran en la pared celular de las plantas [41]. Un alto contenido de xilanos indica un alto contenido de hemicelulosa [42]. A diferencia del glucano y el xilano, el arabinano se encuentra principalmente en la parte externa de la pared celular [43], también es relacionado con la hemicelulosa.

El valor promedio de Acetilos es de 3,04%; los grupos acetilo se unen a la celulosa y la hemicelulosa y pueden afectar la accesibilidad de estos polisacáridos a enzimas que los degradan [44].

También en el cuadro 2, muestra el promedio de Lignina, Extractivos y Cenizas, para Lignina el valor promedio es del 20,71% para Extractivos en alcohol es del 13,58% y para Cenizas es del 10,11%. La lignina es un polímero que se encuentra en la pared celular de las plantas y le da rigidez [45]. Un alto contenido de lignina puede dificultar la degradación de la biomasa [46]; En cambio los extractivos son componentes solubles en alcohol y pueden incluir sustancias como resinas, aceites y taninos; y las cenizas son los componentes inorgánicos de la muestra y pueden incluir sales minerales, metales y otros elementos [47].

En general, estos resultados indican que la muestra de biomasa del tabaco (*Nicotina tabacum* L.) tiene un alto contenido de celulosa y hemicelulosa (glucano y xilanos), así como un contenido significativo de lignina. El bajo contenido de arabinanos indica que la muestra puede tener una pared celular relativamente delgada. El contenido de acetilos sugiere que la degradación de la biomasa podría ser limitada mientras que los extractivos y las cenizas pueden interferir con el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos a partir de la muestra.

A continuación, en el cuadro 3, se aprecia la composición química de la pared celular del tabaco (*Nicotina tabacum* L.) y la suma total de los compuestos: Celulosa, Hemicelulosa, ácido Acético, Lignina, Extractivos y los Inorgánicos.

Cuadro 3. Compuestos de la pared celular del tabaco (*Nicotina tabacum* L.)

Pared celular	Promedio (%)
Celulosa	32,61
Hemicelulosa	17,97
Ácido acético	3,04
Lignina	20,71
Extractivos	13,58
Inorgánicos	10,11
Total	98,02

El contenido promedio de celulosa es del 32,61%, mientras que la hemicelulosa es del 17,97%; la lignina es el tercer componente principal y representa el 20,71% de la composición de la pared celular; además, se encontró un contenido del 13,58% de extractivos y del 10,11% de componentes inorgánicos. Cabe destacar que la suma de los porcentajes no es exactamente del 100%, sino del 98,02%, lo que indica que existen otros componentes presentes en cantidades menores o bien que el proceso de medición no es 100% exacto y preciso.

Propiedades evaluadas

El cuadro 4, muestra la caracterización física de cuatro puntos: molde de diario sin tabaco (1), molde de oficina sin tabaco (2), molde de diario con tabaco (3) y molde de oficina con tabaco (4). Igualmente, se calculó el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación (%CV) para cada variable.

Cuadro 4. Propiedades de los moldes

Puntos	Área (cm ²)	Gramaje (g/cm ²)	Espesor (mm)	Densidad aparente (g/cm ³)	Volumen (cm ³)
1	183,998	0,039	1,870	0,211	34,401
2	179,601	0,040	1,216	0,328	21,843
3	179,897	0,041	2,017	0,205	36,292
4	177,281	0,044	1,629	0,269	28,886
Promedio	180,194	0,041	1,683	0,253	30,355
Desv Est.	2,792	0,002	0,350	0,058	6,487
%CV	1,550	4,741	20,793	22,843	21,370

En este cuadro 4, se observa que el molde de oficina con tabaco tiene el gramaje más alto (0.044 g/cm²), seguido por el molde de diario con tabaco (0.041 g/cm²). Esta mayor densidad superficial puede tener un impacto en la calidad y la resistencia de los moldes, lo que puede ser una ventaja si se busca una mayor durabilidad del molde.

También, se observa en el cuadro anterior, que el molde de diario con tabaco tiene el espesor más alto (2.017 mm), lo que indica que este molde podría ser más resistente a la compresión o deformación. Por otro lado, el molde de oficina sin tabaco tiene el espesor más bajo (1.216 mm), lo que puede hacerlo más ligero y fácil manejo.

De igual manera, en el cuadro anterior, se puede observar que el molde de oficina con tabaco tiene la densidad aparente más alta (0.269 g/cm³), mientras que el molde de diario con tabaco tiene la densidad aparente más baja (0.205 g/cm³). La densidad aparente de un molde es la relación entre su masa y su volumen, indicando que una alta densidad aparente puede hacer que el molde sea más resistente a la compresión y deformación [48]. También, se puede apreciar que el molde de diario con tabaco tiene el mayor volumen (36.292 cm³), mientras que el molde de oficina sin tabaco tiene el menor volumen (21.843 cm³). El volumen de un molde es una medida de su tamaño y capacidad, el volumen puede tener una influencia en el proceso de fabricación de productos a partir de él, ya que afectará la cantidad de material o sustancia que puede alojar el molde [49].

La presencia de residuos fibrosos de tabaco puede proporcionar algunas ventajas en términos de rentabilidad, ya que estos materiales suelen ser más económicos que las pulpas celulósicas recicladas [50]. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas mezclas pueden afectar las propiedades físicas de los moldes, lo que podría tener impacto en la calidad de los productos fabricados con ellos [51].

Por lo tanto, si bien los moldes que contienen tabaco pueden ser más económicos y rentables, es necesario seguir evaluando la calidad de los productos fabricados con ellos y tomar medidas para garantizar que los moldes cumplan con los requisitos y estándares físicos necesarios [52].

Compresión

En el cuadro 5, se muestran los resultados de pruebas de resistencia mecánica en diferentes moldes de una misma muestra identificada por números de molde. Los parámetros medidos son la ruptura máxima (Rup max) en Newton y la carga máxima (Ld max) en milímetros. El %CV mide la variabilidad relativa en los datos, y los valores bajos de desviación estándar indican una mayor precisión en las mediciones.

Cuadro 5. Resistencia a la compresión

Punto	1		2		3		4	
	Nº molde	Rup max (N)	Ld max (mm)	Rup max (N)	Ld max (mm)	Rup max (N)	Ld max (mm)	Rup max (N)
3	214,9	4,49	292,9	4,81	276,2	4,66	343,3	5,48
7	227,0	3,97	242,9	8,84	226,6	6,34	363,5	4,26
11	209,5	5,34	292,6	5,48	228,2	4,19	312,9	3,74
15	242,0	5,48	276,0	7,15	225,8	4,60	316,5	6,51
19	203,4	4,64	310,5	5,48	253,8	6,45	288,7	6,30
23	228,8	4,11	311,4	8,18	231,4	4,63	298,0	5,16
27	197,2	5,09	326,0	6,64	222,9	4,87	363,8	6,93
31	175,8	6,62	336,2	4,95	261,2	5,13	200,3	3,39
35	216,1	4,11	282,1	7,00	243,0	4,39	281,5	5,29
39	219,2	4,00	308,0	6,23	238,7	4,50	324,0	5,90
Promedio	213,2	4,79	297,9	6,48	240,8	4,98	309,25	5,296
Desv Est.	19,6	0,85	26,9	1,35	17,8	0,79	47,78	1,19
%CV	9,2	17,83	9,0	20,84	7,4	15,88	15,45	22,43

El punto 1 del cuadro 5, muestra un promedio de 213,2 N para Rup max y 4,79 mm para Ld max. Los valores de desviación estándar son relativamente bajos, especialmente para Ld max, lo que indica una precisión relativamente alta en las mediciones. Los valores de %CV son aceptables, con un 9,2% para Rup max y un 17,83% para Ld max.

El punto 2 reflejado en el cuadro 5, muestra un promedio de 297,9 N para Rup max y 6,48 mm para Ld max, que son significativamente más altos que los valores del punto 1. Los valores de desviación estándar también son relativamente bajos, lo que muestra una precisión adecuada en las mediciones, aunque los valores de %CV son relativamente altos, con un 9% para Rup max y un 20,84% para Ld max. En relación al punto 3 del cuadro 5, muestra un promedio

de 240,8 N para $R_{up\ max}$ y 4,98 mm para $L_{d\ max}$, los valores de desviación estándar son relativamente bajos y demuestran una precisión razonable en las mediciones, mientras que los valores de %CV indican una variabilidad relativamente alta, con un 7,4% para $R_{up\ max}$ y un 15,88% para $L_{d\ max}$.

Por otro lado, el punto 4 del cuadro 5, muestra un promedio de 309,25 N para $R_{up\ max}$ y 5,296 mm para $L_{d\ max}$, que son significativamente más altos que los valores del punto 1 pero con una variabilidad más alta, indicada por los valores de %CV relativamente altos.

En general, el tipo de molde utilizado puede afectar significativamente la resistencia mecánica de las muestras, siendo evidente en la diferencia entre los valores del punto 1 y punto 2. La inclusión de fibras de tabaco en los moldes no afectó significativamente la resistencia mecánica en comparación con los moldes que no contienen fibras de tabaco.

Conclusiones

Esta investigación de valorización del residuo agroindustrial del tabaco para la elaboración de productos moldeados ha permitido demostrar que es posible utilizar dichos residuos en la formación de productos moldeados.

De manera que, los resultados muestran que el molde de papel de diario (papel periódico) y tabaco origina un producto con mayor área y gramaje en comparación con los moldes de papel de diario y papel de oficina reciclados. También se observa en el cuadro 4, que el molde de papel de oficina reciclado es más delgado que los otros dos moldes y tiene una densidad aparente significativamente mayor.

En cuanto al análisis estadístico, se observa que el área y el gramaje son precisos con una baja variabilidad en las muestras, mientras que el espesor y la densidad aparente presentan mayor variabilidad en las mediciones. Un análisis estadístico puede ser indicativo de que el gramaje y la densidad aparente están altamente relacionados [53] y que pueden utilizarse para separar el molde que contiene papel de diario y tabaco de los otros dos moldes, mientras que el área y el espesor diferencian el molde de papel de oficina reciclado de los otros dos moldes.

Por otro lado, el molde utilizado puede afectar significativamente la resistencia mecánica de las muestras [54]. Los valores de ruptura máxima y carga máxima son más altos en los moldes de papel de oficina en comparación con los moldes de papel diario (papel periódico), y la inclusión de fibras de tabaco no afecta significativamente la resistencia mecánica en comparación con los moldes que no contienen fibras de tabaco.

Así mismo, se ha podido determinar que, los valores de desviación estándar son relativamente bajos, lo que puede ser indicativo de un alto nivel de precisión en las mediciones y en la formación de los moldes [55]; sin embargo, los valores de %CV (coeficiente de variación) indican una variabilidad relativamente alta en algunos casos. Por lo tanto, la uniformidad de la mezcla y calidad de las fibras utilizadas en la producción de los moldes pueden influir en los resultados obtenidos.

Este trabajo ha demostrado que es posible obtener material fibroso a partir de los residuos del tabaco y caracterizarlo física y químicamente; al mismo tiempo, se pueden conseguir productos moldeados a partir de distintas mezclas del material en estudio con pulpas celulósicas recicladas de papel de oficina y diario (papel periódico).

El análisis físico de los moldes con y sin tabaco muestra que la presencia de residuos fibrosos de tabaco puede tener efectos sobre algunas de las propiedades de los moldes [56], como la inestabilidad dimensional, densidad, resistencia compresión, entre otros [57]. El gramaje, la densidad aparente, el volumen y el espesor son algunas de las propiedades evaluadas que

pueden variar según la presencia de tabaco en el molde [58]. Por tanto, se encontró que el molde de oficina con tabaco tiene una densidad y un gramaje más altos en comparación con el molde de oficina sin tabaco; del mismo modo, el molde de diario con tabaco tiene un espesor y un volumen mayor que el molde de diario sin tabaco.

Referencias

- [1] M. Romano y F. Andrés, "Residuos de la industria de celulosa moldeada. Producción de paneles de relleno para la construcción". Centro de investigación y desarrollo para la construcción y la vivienda (cecovi) Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe, 2013
- [2] S. Saval, "Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales", Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D.F, 2012
- [3] Rotoplas, "Qué es la agroindustria y por qué es importante en Argentina", 2021 En línea <https://rotoplas.com.ar/agroindustria/que-es-la-agroindustria-y-por-que-es-importante-en-argentina/>
- [4] A. Sluiter, R. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton y D. Crocker, "Determination of Structural. National Renewable Energy Laboratory. Laboratory Analytical Procedure (LAP)", 2008
- [5] M. Cantado, Q. Tarrés, J. Méndez., P. Mutjé y M. Delgado, "Drying kinetics of bleached and unbleached kraft pulps from eucalyptus globulus". Journal of Applied Polymer Science, 92(1), 332-337, 2004 En línea: <https://doi.org/10.1002/app.13563>
- [6] Y. Liu, C. Cao, H. Guo y D. Luo, "Lignin-derived polyphenol-based carbon dots for imaging-guided chemo-photothermal combination therapy of cancer". Journal of Materials Chemistry B, 8(28), 6062-6070, 2020 En línea doi:doi.org/10.1039/D0TB00561D
- [7] S. Park, S. Kim, Y. Seo y B. Lee, "Characteristics of cellulose extracted from tobacco stem for pulp and paper production". BioResources, 15(1), 1218-1232, 2020
- [8] T. Lindström, G. Carlsson y P. Larsson, "Pulp and paper chemistry and technology. Fiber Chemistry. Walter de Gruyter", 2005.
- [9] S. Qin, Y. Chen, S. Tao, C. Zhang, X. Qin, P. Chen y H. Qi, "High recycling performance of holocellulose paper made from sisal fibers". ELSEVIER, 2022.
- [10] T. Chakrabarty, N. Karak y B. Sarkar, "Pulp and paper production from tobacco stem: An environment friendly approach for waste utilization". Journal of Cleaner Production, 117, 1-8, 2016.
- [11] Ministerio de Energía y Minas, "Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético. Lima: dirección general de eficiencia energética ministerio de energía y minas, 2016.
- [12] P. Mocchiutti, "Mejora de propiedades papeleras de pulpas celulósicas significadas de reciclo. Aplicación de tratamientos oxidativos enzimáticos y químicos". Instituto de Tecnología Celulósica – Facultad de Ingeniería Química Universidad Nacional del Litoral, 2007.
- [13] M. Didone. Y G. Toselló, "Molded pulp products for food packaging: State of the art and research challenges". Journal of Agricultural Engineering, 50(2), 63-79, 2019.
- [14] P. Panneerselvam, K. Mahesh, K. Varadharajan, K. Shanmugarajan, P. Srinivasan y V. Krishnaswamy, "Review of tobacco waste management techniques". Environmental impact assessment review, 86, 106531, 2021.
- [15] P. Peng, L. Chen y H. Chen, "The manufacture of food packaging from bamboo pulp". Packaging Technology and Science, 19(1), 41-49, 2006. En línea <https://doi.org/10.1002/pts.710>
- [16] P. Rattanawongkun, N. Kerddonfag, N. Tawicha, U. Intatha y N. Soykeabkaew, "Improving agricultural waste pulps via self-blending concept with potential use in moulded pulp packaging". Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020.
- [17] F. López, R. Zuluaga, C. Orrego y P. Gañán, "Cellulose chemistry and applications. Nova Science Pub Incorporated", 2018.
- [18] S. Rattanawongkun, N. Ke, P. Tawich, U. Intatha y N. Soykeabkaew, "Evaluation of physical properties of paper sheets made from agricultural residues". Journal of Material Cycles and Waste Management., 22, 35-45, 2020.
- [19] K. Dubey y A. Singh, "Paper production from recycled waste paper by pulping: A review". Journal of Materials Research and Technology, 13, 18-27, 2021. En línea <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.052>
- [20] K. Semple, C. Zhou, O. Rojas, W. Nguegang y C. Dai, "Moulded pulp fibers for disposable food packaging: A state-of-the-art review". Food Packaging and Shelf Life., 33, 2022.

- [21] M. Ghorbani, P. Rezayati., A. Raisi, M. Faezipour y M. Taherzadeh, "Agricultural residue pulping and paper production", *Cellulose*, 27(18), 10489-10517, 2020. En línea <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03449-5>
- [22] E. Miedes, M. Minteguiaga, A. Vallejo y F. Vilaseca, "New strategies to improve physical properties of recycled paper. Environmental Science and Pollution Research", 26(19), 19779-19791, 2019.
- [23] B. Saha y R. Chowdhury, "Hemicellulose Biorefineries. Biochemical and Biophysical", *Research Communications*, 534, 616-624, 2021. En línea <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.11.068>
- [24] Q. Tarrés, F. Espinach, S. Boufi y P. Mutjé, "The challenge of increasing the use of recycled fibers in paper-making". The current state of the art. *BioResources*, 12(1), 2143-2160, 2017.
- [25] P. Zhao, Y. Liu, B. Zhang, Y. Li, F. Wang y L. Chen, "Caustic lignin enhances properties of bagasse pulp through spin coating". *Cellulose*, 27, 8825-8834, 2020. En línea <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03343-0>
- [26] Y. Zhang, Y. Duan, V. Bokka, K. He y Y. Ni, "Biodegradable and Compostable Thermoplastic Starch-Based Materials for Sustainable Packaging Applications". *Polymers*, 13(18), 3120, 2021.
- [27] Y. Wang, L. Zhu, C. Li, L. Wang y X., "A critical review of lignocellulose crystallinity in biomass conversion". *International Journal of Biological Macromolecules*, 176, 38-48, 2021.
- [28] B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, A. Sluiter, J. Sluiter y D. Templeton, "Technical Report NREL/TP-510-42620. Preparation of Samples for Compositional Analysis. (L. A. (LAP), Ed.)" National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [29] H. Zhang, C. Duan, S. Bokka, H. He y Y. Ni, "Life cycle assessment and optimization of paper recycling system considering regional carbon intensity and transport distance in China". *Journal of Cleaner Production*, 315, 128162, 2021. En línea <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128162>
- [30] Y. Vargas y L. Peréz, "Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente". Revista Facultad de Ciencias Básicas, 2018.
- [31] X. Tian, H. Liu, X. Teng, R. Yang y X. Li, "Chemical composition and characteristics of cellulose fiber from tobacco stem". *Industrial Crops and Products*, 128, 551-557, 2019.
- [32] Q. Tarrés, N. Pellicer, A. Balea, N. Merayo, C. Negro, A. Blanco y P. Mutjé, "Lignocellulosic micro/nanofibers from wood sawdust applied to recycled fibers for the production of paper bags". Elsevier, 2017.
- [33] L. Wang y S. Li, "Review on research of pulp molded product quality and production technology". *Advanced Materials Research*, 1043, 784-790, 2014. En línea <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1043.784>
- [34] V. Veintemilla, "Procesos de Moldeado", 2020. En línea <https://es.scribd.com/document/392162516/Procesos-de-Moldeado>
- [35] TAPPI. "Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Test Methods. 2000-2001. Norma Estandarizadas", 2001.
- [36] Y. Zhang, C. Duan, S. Bokka, Z. He y Y. Ni, "Molded fiber and pulp products as green and sustainable alternatives to plastics" A mini review, 2021.
- [37] C. Huang, L. Feng, Z. Zhang, S. Yang y J. Li, "Improvement of molding process of pulp molding products based on experimental study and simulation analysis". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 3425-3435, 2021. En línea <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06472-0>
- [38] L. Jaramillo y A. Cuartas, "Elaboración de materiales compuestos a partir de cascarilla de arroz y matrices termoplásticas". *Tecnológico de Antioquia*, 2020. En línea <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tdea/928?locale-attribute=en>
- [39] M. Hubbe, R. Venditti y O. Rojas, "What happens to cellulose fibers during papermaking and recycling? A review", *BioResources*, 2(4), 739-788, 2007.
- [40] H. Jiang, H. Meng, H. Wang y Z. Wang, "Comprehensive utilization of tobacco industry waste: A review", *Journal of cleaner production*, 255, 120338, 2020.
- [41] V. Kumar, S. Luthra y R. Gupta, "A Review on Tobacco as a Potential Source of Cellulose and its Applications. International". *Journal of Chemical Studies*, 7(4), 2862, 2019.
- [42] IMAM, CONICET – UNaM. IMAM, 2020. En línea imam.conicet.gov.ar/gobierno/
- [43] K. Lindeberg, M. Ross y K. Butler, "Tobacco use and the heart. Cleveland Clinic" *Journal of Medicine*, 85(12), 924-930, 2018.
- [44] M. Guidobaldi, "Estudio sobre la gestión de residuos de papel y cartón con la finalidad de su recuperación, a través del reciclado", Tesis de grado, Universidad Nacional de Córdoba, 2012.

- [45] M. Kumar, Y. Negi, N. Singh, B. Sarkar y R. Singh, "Production and characterization of unbleached pulp from agricultural residue wheat straw employing alkaline sulfur-free processes. Frontiers in Energy", Research, 8, 637148, 2021. doi:doi.org/10.3389/fenrg.2020.637148
- [46] X. Li, Y. L. Liu, "The effect of headgroup charge density of cationic surfactants on the compatibility and wetting of oil-wet kaolinite". Applied Clay Science, 22(3-4), 139-152, 2003, doi:https://doi.org/
- [47] Gobierno Nacional de Argentina, "Plan Argentina Innovadora", Obtenido de Agroindustria, 2020. En línea <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/argentina-innovadora-2030/plan-argentina-innovadora-2020/agroindustria>
- [48] V. Kumar, V. Yadav y A. Singh, "Tobacco stem as an alternative raw material for paper industry", Journal of Scientific and Industrial Research, 74(10), 527-530, 2015.
- [49] R. Gupta, S. Luthra y V. Kumar, "Tobacco: Its Historical, Cultural, and Medicinal Importance with a Special Focus on its Usage in Paper Manufacture". Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology, 14(2), 1072-1076, 2020.
- [50] Mongabayauthor, "Cambio climático", 2014. En línea <https://es.mongabay.com/2014/04/como-la-agricultura-industrial-esta-contribuyendo-al-cambio-climatico/>
- [51] N. Aguilar, "El reciclado de papel y cartón". Ciencia y Cultura; elementos, 2004.
- [52] ASPAPEL, "Tu papel es Importante". Madrid: Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón, 2005.
- [53] M. Didone, F. Chenlo, G. Tosello, "A new ecodesign approach for packaging made of biodegradable materials", Journal of Cleaner Production, 141, 1141-1151, 2017.
- [54] D. Dai, X. Fan, Y. Wang, C. Zhang y H. Jian, "What factors drive the price volatility of recovered paper in China?" Business Management Dynamics, 6(7), 16-28, 2017.
- [55] C. Dislaire, B. Seantier, M. Muzy y Y. Grohens, "Mechanical and hygroscopic properties of molded pulp products using different wood-based cellulose fibers". Polymers, 2021. En línea 13. doi:doi:https://doi.org/10.3390/polym13193225
- [56] G. Gavazzo, R. Lanouette y J. Valade, J. "Fabricación de productos en pulpa moldeada". Ciadicyp, 2017.
- [57] K. Caballero, W. Patiño, B. Alvarado, J. Parra y D. Rodriguez, "Obtención de acetato de celulosa a partir de papel reciclado: una alternativa para la producción de acetato de celulosa en Colombia", 2020.
- [58] O. Castellano, "Diseño de un sistema de recolección y disposición de papel como alternativa sustentable para "el consorcio el sitio" (municipio paz castillo, estado miranda). Universidad de Carabobo facultad ingeniería escuela de ingeniería civil departamento de ingeniería ambiental", Trabajo Especial de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil, 2011.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.