



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Mayo 2022
Volumen 35
ISSN-E 2215-3241

Número especial
V Encuentro Bienal
Centroamericano
y del Caribe de
Investigación y Posgrado

Publicación y directorio en catálogos

latindex

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Docencia Científica

DOAJ

Dialnet

melICA

SciELO

ET
Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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

Kevin Arias-Ceciliano

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica de Costa Rica. - Vol. 35, especial. V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado Junio, 2022- 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>
https://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



www.latindex.unam.mx



dialnet.unirioja.es



<https://redib.org>



<http://www.scielo.org/>



<http://www.amelica.org>



<http://www.doaj.org/>



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Presentación número especial

Presentation special issue

Teodolito Guillén-Girón 3

Estudio de la productividad y biomasa arriba del suelo, mediante el uso de índices de vegetación en plantaciones de *Tectona grandis* L. (Teca) ubicadas en Guanacaste, Costa Rica

Study of productivity and biomass above the ground, using vegetation indices in plantations of *Tectona grandis* L. (Teak) located in Guanacaste, Costa Rica

Arleth V. Porras-Granados, Dagoberto Arias-Aguilar, Casia Soto-Montoya, Vinicio Ríos-Garro 5

Sistema de visión hiperspectral para el estudio de especies arbóreas tropicales

Hyperspectral vision system to study tropical species of trees

Arnoldo Ramírez-Jiménez, Dagoberto Arias-Aguilar, Juan Carlos Valverde-Otárola, Nelson Zamora-Villalobos, María Rodríguez-Solís, Ernesto Montero-Zeledón 16

Mapas interactivos: una herramienta para el análisis exploratorio de datos ético

Interactive maps: a tool for ethical exploratory data analysis

Cristina Soto-Rojas 24

Bioprospección de microorganismos de la zona Norte de Cartago con potencial de biocontrol de enfermedades postcosecha en cebolla (*Allium cepa*)

Bioprospecting microorganisms from the North of Cartago with potential for biocontrol of postharvest diseases in onion (*Allium cepa*)

Karla Aymerich-Picado, William Watson-Guido, Jaime Brenes-Madríz, William Rivera-Méndez 32

Crecimiento y desarrollo inicial de *Musa textilis* Née y su interacción con las especies maderables *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* y *Dipterix panamensis* en Costa Rica

Growth and initial development of *Musa textilis* Née and its interaction with the timber species *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* and *Dipterix panamensis* in Costa Rica

Mónica Araya-Salas, Dagoberto Arias-Aguilar, Juan Carlos Valverde-Otárola, Kevin Arias-Ceciliano, Jesús Mora-Molina..... 40

Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales

Advances in research carried out on abaca crops established in Costa Rica with special reference to agroforestry systems

Mónica Araya-Salas, Dagoberto Arias-Aguilar, Juan Carlos Valverde-Otárola, Kevin Arias-Ceciliano, Freddy Muñoz-Acosta, Ana Marlen Camacho-Calvo, Giovanni Garro-Monge, Karol Jiménez-Quesada, Jesús Mora-Molina..... 50

Vivienda nómada: solución de vivienda móvil en Costa Rica para ambientes urbanos y rurales sostenibles

The nomadic housing, a mobile solution in Costa Rica for environments sustainable urban and rural

Isaac Jose Solís-Mejía, Carlos Ugalde-Hernández, Dagoberto Arias-Aguilar 60

El manejo forestal del bosque secundario como alternativa de uso de la tierra en la zona norte de Costa Rica

Forest management of secondary forest as an alternative land use in the northern zone of Costa Rica

Ronny Villalobos-Chacón..... 70

Presentación número especial

Presentation special issue

Teodolito Guillén-Girón¹

Guillén-Girón, T. Presentación número especial. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 3-4.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6245>

¹ Director. Dirección de Posgrados. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: tguillen@itcr.ac.cr

En este número especial de la Revista *Tecnología en Marcha* se recopila las ponencias de las y los estudiantes de los programas de posgrado del Instituto Tecnológico de Costa Rica, que fueron presentadas durante en el *V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado 2021*, que se llevó a cabo los días 25 y 26 de noviembre de 2021 de forma virtual.

El Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado, es una actividad académica organizada de forma bianual por parte del Sistema Regional Centroamericano y del Caribe de Investigación y Postgrado (SIRCIP) y la coordinación de esta edición 2021 estuvo a cargo de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras y la participación las instituciones de educación superior públicas de Honduras, El Salvador, Nicaragua, Guatemala, Belice, Panamá, Costa Rica y República Dominicana.

El objetivo principal de dicho evento es Propiciar un espacio de intercambio académico inter y transdisciplinario entre investigadores, profesores y estudiantes de posgrado con el fin de fortalecer y divulgar los procesos y productos de la investigación en los temas definidos como prioritarios para la región.

Este año las ponencias de los estudiantes de posgrado abordaron varios de los ejes temáticos que fueron definidos a partir de la en la agenda regional del Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA), los cuales fueron:

1. Salud pública, enfermedades crónicas no transmisibles e infecciosas;
2. Desarrollo y seguridad alimentaria y nutricional;
3. Población, educación, inclusión social e interculturalidad;
4. Democracia, gobernabilidad y seguridad ciudadana;
5. Territorialidad, riesgo y desarrollo local;
6. Tecnologías, innovación y energías renovables;
7. Cambio climático y gestión ambiental.

Las ponencias presentadas constituyen una muestra de los productos científicos de algunos de los proyectos de investigación que se realizan en el Instituto Tecnológico de Costa Rica; por lo cual desde la Dirección de Posgrados nos llena de orgullo incentivar y apoyar a nuestros y nuestras estudiantes de programas de posgrados, para que puedan asistir a actividades de proyección nacional e internacional.

Felicitamos al estudiantado de posgrado por sus esfuerzos y su colaboración a la investigación en el país, desde nuestro querido TEC.

Estudio de la productividad y biomasa arriba del suelo, mediante el uso de índices de vegetación en plantaciones de *Tectona grandis* L. (Teca) ubicadas en Guanacaste, Costa Rica

Study of productivity and biomass above the ground, using vegetation indices in plantations of *Tectona grandis* L. (Teak) located in Guanacaste, Costa Rica

Arleth V. Porras-Granados¹, Dagoberto Arias-Aguilar², Casia Soto-Montoya³, Vinicio Ríos-Garro⁴

Porras-Granados, A. V; Arias-Aguilar, D; Soto-Montoya, C; Ríos-Garro, V. Estudio de la productividad y biomasa arriba del suelo, mediante el uso de índices de vegetación en plantaciones de *Tectona grandis* L. (Teca) ubicadas en guanacaste, costa rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 5-15.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6229>

- 1 Ingeniera Forestal. Programa Maestría en Ciencias Forestales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: arporras@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0474-4774>
- 2 Ingenier Forestal. Laboratorio de Ecofisiología Forestal y Aplicaciones Ecosistémicas (EcoPlant), Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: darias@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>
- 3 Ingeniera Forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: csoto@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2275-7317>
- 4 Ingeniero Forestal. Panamerican Woods S.A. Costa Rica. Correo electrónico: vrrios@pawcr.com

Palabras clave

NDVI; GNDVI; Savi; reflectancia espectral; Sentinel.

Resumen

La estimación del volumen de la madera o de la biomasa en plantaciones forestales es una de las variables clave para la toma de decisiones del manejo forestal, para mejorar la productividad y la rentabilidad de los productos y servicios ambientales que ofrecen. Las técnicas tradicionales se han basado en inventarios de campo, mediante muestreo con parcelas y con intervención humana en la adquisición de variables a nivel de árbol y de rodal. La tecnología actual permite realizar estimaciones mediante sensores en vehículos autónomos y con satélites. En Costa Rica, los estudios con imágenes satelitales Landsat y RapidEye han permitido generar mapas actualizados sobre cobertura y uso del suelo, incluyendo los tipos de bosques. Sin embargo, hay pocos estudios sobre la relación entre los valores de volumen y biomasa, calculados a partir de los datos medidos en campo y los calculados con percepción remota. Este artículo presenta la metodología propuesta, para estimar la productividad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L. (Teca) utilizando imágenes satelitales Sentinel-2. Se tomó en cuenta las recomendaciones de otros autores y la experiencia de los investigadores. Se propone comparar la información generada con Sentinel-2 y la adquirida con un VANT con una cámara multiespectral. Se espera aportar una metodología que utilice sitios de muestreo representativos, con un tamaño de muestra adecuado, con un control de las condiciones ambientales, que tome en cuenta la edad, el estado fenológico y los tratamientos silviculturales.

Keywords

NDVI; GNDVI; Savi; spectral reflectance; Sentinel.

Abstract

The estimation of wood volume or biomass in forest plantations is one of the key variables for forest management decision making, to improve productivity and profitability of the products and environmental services they offer. Traditional techniques have been based on field inventories, through sampling with plots and human intervention in the acquisition of variables at tree and stand level. Current technology allows estimates to be made using sensors in autonomous vehicles and satellites. In Costa Rica, studies with Landsat and RapidEye satellite images have made it possible to generate updated maps on land cover and land use, including forest types. However, there are few studies on the relationship between volume and biomass values, calculated from data measured in the field and those calculated with remote sensing. This article presents the proposed methodology to estimate the productivity of *Tectona grandis* L. (Teak) forest plantations using Sentinel-2 satellite images. Taking into account the recommendations of other authors and the experience of the researchers. It is proposed to compare the information generated with Sentinel-2 and that acquired with a UAV with a multispectral camera. It is expected to provide a methodology that uses representative sampling sites, with an adequate sample size, with a control of environmental conditions, considering age, phenological stage and silvicultural treatments.

Introducción

A nivel mundial se produjo para el año 2020 una pérdida de 25,8 millones de hectáreas de cobertura forestal, de las cuales 4,2 pertenecían a bosques primarios, lo cual, genera una gran pérdida en los servicios ecosistémicos [1]. Una manera de compensar parcialmente esta pérdida es mediante los programas de reforestación.

En la actualidad, de acuerdo con Müller *et al.*, [2], las plantaciones forestales ocupan un área que ronda los 53,4 millones de hectáreas en el mundo; de las cuales, un 46,4% se puede encontrar en América Latina y su principal uso se centra en la producción de celulosa, como componente principal para fabricación de papel, cartón, conglomerados, entre otros [3].

A nivel nacional, para el año 2019 se procesó un total de 874 863 m³ de madera en rollo, proveniente en un 79,2 % de plantaciones forestales, 16,9% de terrenos de uso agropecuario y 3,9% de bosques [4]. Sin embargo, aun alcanzando estas cifras de procesamiento de madera, “el déficit comercial de productos de madera y muebles disminuyó para el año 2020, en comparación al año 2019” [5]. De estos beneficios que obtuvo el país, especies como *Tectona grandis* (teca) fue considerada como la especie con los volúmenes de exportación de madera en bruto más altos, con estimaciones de exportaciones de hasta 192 830 m³ a países como India, China y Vietnam [4].

De las estadísticas recientes, la teca fue establecida bajo distintos sistemas de producción mayormente en la Península de Nicoya [6], [7]. Fue la especie de mayor valor económico con un valor de 875 colones por pulgada maderera tica [4].

Por tanto, debido a que la producción de madera de teca ha sido la principal fuente de ingresos de muchos de los productores forestales de Costa Rica, y además generó aportes significativos a la economía, mantener un control/registro del volumen de madera producida en el campo se vuelve un tema de suma importancia.

Por otra parte, es conocida la importancia de la biomasa forestal como variable para cuantificar la estructura y función de los ecosistemas forestales [8] y se han reportado registros que asignan esta variable (biomasa aérea) como un indicador de la productividad de las plantaciones forestales; que permite conocer su estado de desarrollo y el potencial de rendimiento en volumen. Esta variable del rodal actualmente es determinada mediante el uso de ecuaciones alométricas [9], [10], debido a que, el método tradicional para determinar la biomasa arriba del suelo en plantaciones forestales ha sido un método caracterizado por ser destructivo y costoso [11]. Asimismo, en la literatura mundial se han reportado estudios que comprueban que un uso adecuado de índices de vegetación obtenidos mediante imágenes satelitales y drones es efectivo para determinar la productividad (volumen y biomasa arriba del suelo) de sistemas agrícolas, forestales, entre otros; y de igual manera, puede determinarse mediante ecuaciones alométricas [12], [13], [14], [15], [16], [17]. Específicamente, de acuerdo con Nuthammachot *et al.*, [18], los datos obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 poseen buena correlación con la biomasa aérea de cobertura forestal, dichos autores encontraron una correlación entre ambos parámetros con un valor de $R^2 = 0,82$.

Este estudio propone una metodología para el desarrollo de ecuaciones alométricas que permitan estimar la productividad de plantaciones de teca, mediante la utilización de índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes satelitales Sentinel-2 para una localidad de Costa Rica. Se pretende promover el uso de mecanismos indirectos para la estimación de la productividad de plantaciones forestales, asegurando al productor/inversionista una buena estimación y una disminución en los costos en los que se incurre al determinar la productividad de manera tradicional (inventarios de campo). A pesar de que esta metodología puede ser

mejorada en la ejecución del proyecto, se consideró la publicación para dar a conocer el trabajo que se está realizando con el fin de orientar a los que están iniciando un proyecto similar y tener realimentación de otros investigadores.

Metodología

Área de estudio

Se seleccionaron una serie de lotes de la finca Palo Arco (figura 1) propiedad de la empresa Panamerican Woods, ubicada en la provincia de Guanacaste, en el cantón de Nandayure, Costa Rica, entre las coordenadas geográficas -85.268, 9.798 y -85.209, 9.879 (WGS84 EPSG:4326). Donde la temperatura promedio anual oscila entre los 25-36 °C, con precipitaciones anuales de 2299 mm y una elevación de 11 msnm. Los lotes de estudio, dentro del mosaico de plantaciones *Tectona grandis* L. (teca) de la empresa, cubren un área aproximada de 175,89 hectáreas, con árboles en edades que van desde 1 año hasta los 30 años.

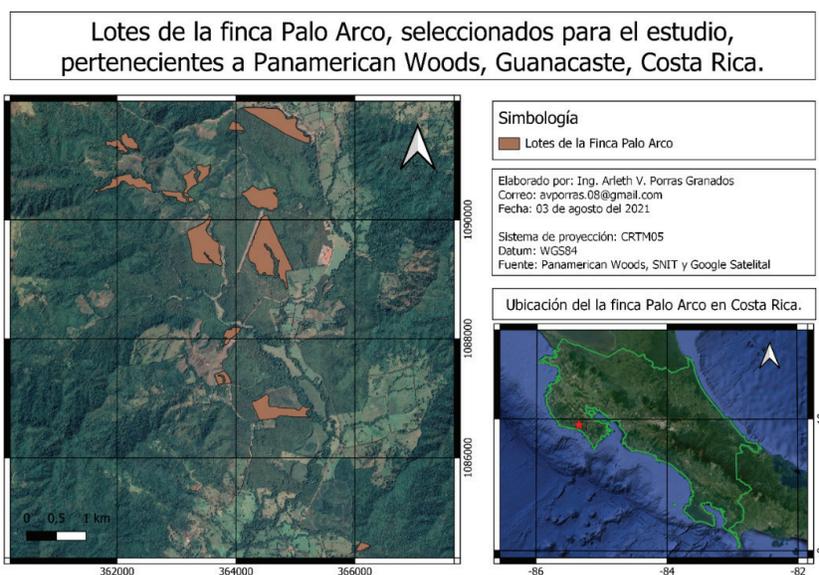


Figura 1. Área de estudio.

Partiendo de los archivos shape de los lotes de teca pertenecientes a la plantación de la finca Palo Arco proporcionados por la empresa, en donde se presentaba un intervalo muy amplio de edades; se crearon cuatro clases, la selección de estas clases fue basada en el comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), para las imágenes Sentinel-2 de la finca correspondientes al mes de mayo del 2020. La distribución de las clases se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clases de edades propuestas de acuerdo con el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI de la finca Palo Arco.

Límite inferior (Años)	Límite superior (Años)	Clase
1	6	1
7	11	2
12	15	3
16	30	4

Una vez clasificados los lotes según la clase correspondiente, se excluyeron los lotes con las siguientes cualidades: ensayos clonales, con rebrotes y con manejo atípico por inundación. Posterior a esto, se seleccionaron de forma aleatoria tres lotes por clase, con la restricción de poseer un área efectiva mayor a 1 hectárea. Los lotes seleccionados se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Lotes seleccionados aleatoriamente por clase de edad.

Plantación	Nombre	Número lote	Área (ha)	Año siembra	Edad (2021)	Clase
Palo Arco	Almendro C	40	7,752	2019	2	1
Palo Arco	San Jorge C	43	18,971	2017	4	1
Palo Arco	Peñón A	18	9,424	2016	5	1
Palo Arco	Cenízaro	67	1,999	2014	7	2
Palo Arco	Mango	12	42,219	2012	9	2
Palo Arco	Fernando	21	8,666	2011	10	2
Palo Arco	Cortes Baja	7	16,829	2008	13	3
Palo Arco	Nance	27	11,091	2008	13	3
Palo Arco	John Norte	1	23,913	2007	14	3
Palo Arco	Basurero B	14	4,884	2005	16	4
Palo Arco	Bosquecito C	4	2,661	2005	16	4
Palo Arco	Samuel	32	27,482	2005	16	4

Diseño experimental

Se consideró la definición de cuatro bloques de acuerdo con la edad de las plantaciones, en cada bloque se seleccionaron tres lotes y en cada lote se ubicaron tres parcelas tomando como centro las parcelas permanentes de la empresa, para un total de 36 parcelas (unidades muestrales). Cada parcela con un tamaño de 60 x 60 metros. De estas 36 parcelas, para la generación de los modelos alométricos se utilizarán 28 parcelas (siete parcelas de cada bloque) y ocho parcelas para la validación de dichos modelos (dos parcelas de cada bloque). El centro de cada parcela y los árboles serán localizados con el Garmin GPSMAP® 64st.

El tamaño de parcela escogido se debe a que las bandas necesarias para la estimación de los índices de vegetación (NDVI, GNDVI y Savi) en estudio poseen una resolución espacial de 10 metros. Por lo tanto, se decidió utilizar parcelas de mayor área, si bien es cierto en la mayoría de los estudios realizados se utilizan parcelas más pequeñas [19], [20], [21], los resultados mostrados en estos estudios suelen ser positivos; sin embargo, no excelentes, y además se han observado resultados más favorables en parcelas de mayor tamaño como lo son las parcelas de 60 x 60 metros [22]. También con el tamaño de parcela propuesto para el estudio se espera disminuir el error experimental y se visualiza la obtención de resultados de mejor calidad a los ya obtenidos en estudios similares.

Resultados de las etapas que se deben considerar en este tipo de estudios

A partir de la revisión del estado del arte, de las experiencias en otros países y de la experiencia personal de los investigadores, se propone la siguiente metodología.

Imagen satelital

Autores recomiendan aplicar a las imágenes satelitales un preprocesamiento específico antes de calcular los índices de vegetación, el cual consiste en realizar correcciones atmosféricas, geométricas y radiométricas [23], [24], [21].

Las imágenes satelitales Sentinel-2 que se deben considerar deben ser las más cercanas a la fecha del levantamiento de cada una de las parcelas, un preprocesamiento de las imágenes con cuatro programas de computación: Google Earth Engine, R Studio, QGIS-SCP y SNAP, son recomendables con el fin de obtener un nivel de preprocesamiento 2A que corresponde a orto imágenes con la reflectancia corregida de fondo de atmósfera (BOA).

Datos del VANT con una cámara multispectral

Se deben colocar 21 marcas de control y la localización de las marcas deben tener un nivel de precisión vertical y horizontal de $\pm 0,1$ m que pueden ser obtenidas con el GPS propio del VANT. Se busca que la adquisición de los datos con un VANT disponga de una cámara multispectral con un traslape de un 80% y una altura de vuelo de 80 metros. Para procesar la información recopilada se recomienda el uso del programa PIX4Dmapper y la generación de un mosaico orto rectificado incluyendo todas las bandas de la imagen.

Cálculo de los índices de vegetación

Se debe procesar la información para obtener el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI) y el índice de vegetación ajustado al suelo (Savi). Lo anterior para las imágenes satelitales Sentinel-2, las imágenes obtenidas con el VANT y con los datos recolectados a nivel de rodal mediante el espectrómetro UniSpec SC y con el espectrómetro construido en el TEC (esto aplica para estudios posteriores de los autores). Cada índice será calculado para cada parcela, con las ecuaciones que se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Índices de vegetación utilizados en el estudio.

Abreviatura	Ecuación	Referencia
NDVI	$\frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + R_r}$	(Galidaki <i>et al.</i> , 2017)
GNDVI	$\frac{R_{nir} - R_v}{R_{nir} + R_v}$	(Baloloy <i>et al.</i> , 2018)
Savi	$\frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + R_r + L} * (1 + L)$	(Ghosh & Behera, 2018)

R: reflectancia; *nir*: banda de infrarrojo (B8); *r*: banda roja (B4); *v*: banda verde (B3); L: constante (este valor será estimado de acuerdo con la proporción entre la vegetación y el suelo de cada parcela).

Los índices de vegetación utilizados en el presente estudio fueron seleccionados tomando en cuenta las recomendaciones de autores, los cuales mencionaron obtener buenos resultados en estudios similares. Autores mencionan que, el índice NDVI fue el que mejor representó los datos de campo relacionado con las imágenes satelitales Sentinel-2 [25], dicho índice demuestra un alto potencial en la gestión ambiental y para la estimación de biomasa y productividad de la vegetación, además de ser este el índice de vegetación más representativo [26], [27],

[28], [29], [30]. Por su parte el GNDVI se caracteriza por ser un índice similar al NDVI; sin embargo, este utiliza la banda del verde en lugar de la banda del rojo lo cual indica una mayor correlación con las coberturas vegetales debido al asocio directo que presenta esta banda con la concentración de clorofila presente en dichas coberturas [31] y según mencionan ambos índices de vegetación tanto el NDVI como el GNDVI tienen una correlación positiva con el volumen de la planta en el campo y se utilizan para estimar el rendimiento [32]. Por otra parte, el índice Savi es conocido por su función en la reducción de influencia del suelo en los resultados obtenidos [33], [30].

Datos de campo

Un estudio de esta naturaleza debe prever el estado fenológico de la plantación. Para la especie seleccionada y el área de estudio, se debe prever un levantamiento de información en época lluviosa y en la transición a la época seca. Para cada condición se debe realizar un levantamiento de información en las 36 parcelas, y registrar la variable dasométrica de diámetro a la altura de pecho (*dap* a 1,3 metros), idealmente también las alturas con hipsómetro láser. Una muestra de medición de 50 árboles por parcela es adecuada; los cuales, deben ser seleccionados siguiendo un patrón en zigzag y midiendo un árbol cada ocho individuos a lo largo de toda la parcela. Para medir la reflectancia con el UniSpec SC se debe seguir la metodología de Ramírez-Mesén [34], con al menos cinco mediciones por hoja; las cuales deben ser promediadas, para un total de 10 hojas por árbol; las cuales, también deben promediarse. Para la selección de las hojas de cada árbol se debe seguir la metodología propuesta por Murillo *et al.*, [35], las hojas se deben obtener del tercio superior completamente iluminado del árbol, con la ayuda de algún equipo, por ejemplo, podadoras de extensión o con elementos de corte de ramas. Las hojas deben ser seleccionadas para que no presenten decoloración, tomadas de la parte superior de la copa expuesta al sol (lo más alto posible), limpias, libres de patógenos, daños por insectos, musgo y/o epífitas, se deben recolectar de la porción distal o media de la rama. Siempre que se pueda, las hojas serán medidas inmediatamente al ser cortadas; y en los casos en los cuales esto no es posible, las hojas cortadas deben ser colocadas entre toallas de papel humedecidas con agua destilada estéril, guardadas en bolsas de plástico herméticas debidamente rotuladas, evitando su exposición al sol y colocadas en una hielera para ser llevadas al laboratorio para su respectiva medición.

El protocolo de campo debe considerar el registro del número de individuos por parcela y las coordenadas del centro de cada parcela.

Cálculo del volumen y biomasa

El volumen, se estimó con el siguiente modelo alométrico (ecuación 1).

$$Vol = -0,0068 * dap + 0,0010 * dap^2 \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde: *Vol* es igual al volumen (m³) y *dap* es igual al diámetro a la altura de pecho (cm).

Es comprensible que cada empresa tenga desarrollados sus propios modelos alométricos, los cuales deberán usarse para obtener la biomasa aérea, en toneladas por hectárea preferiblemente usando el *dap* como variable independiente, siempre y cuando la precisión y el cuadrado medio del error sean adecuados.

Base de datos

La base de datos puede procesarse en Excel con la información de las parcelas, incluyendo el volumen y la biomasa calculados, los índices de vegetación y el promedio de la reflectancia de cada una de las bandas espectrales de la imagen Sentinel-2, de las imágenes del VANT y del UniSpec.

Manejo estadístico de la información

La realización de un análisis de componentes principales ayudará a describir el conjunto de datos en términos de nuevas variables («componentes») no correlacionadas. En el análisis de los modelos de regresión, se deben evaluar los coeficientes de determinación (R^2) y los errores medios cuadráticos (EMC). Además, para examinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre los resultados estimados de los diferentes modelos, o bien al utilizar distintos programas o entre la información generada de Sentinel-2, del VANT y del UniSpec; se recomienda la técnica de análisis de varianza (ANOVA) con un nivel $p < 0.05$, validando los supuestos del análisis y utilizando las pruebas de comparación múltiple cuando corresponda.

Resultados preliminares de generación de índices de vegetación

La figura 2 muestra el NDVI, de la zona de estudio tomando como referencia la clasificación propuesta por Aquino y Oliveira [36] que se muestra a continuación.

Cuadro 4. Descripción e intervalo de clase NDVI para cobertura vegetal.

Clase	Criterio de clasificación
Suelo desnudo o agua	$NDVI \leq 0$
Muy bajo	$0 < NDVI \leq 0.2$
Bajo	$0.2 < NDVI \leq 0.4$
Moderadamente bajo	$0.4 < NDVI \leq 0.6$
Moderadamente alto	$0.6 < NDVI \leq 0.8$
Alto	$0.8 < NDVI \leq 1$

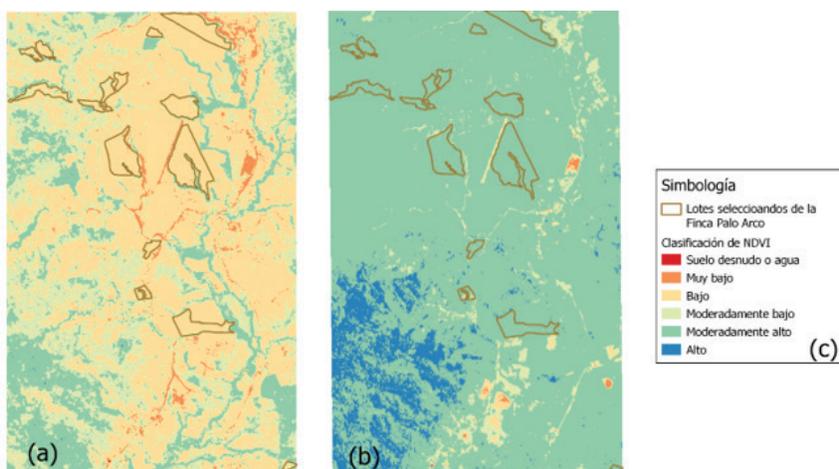


Figura 2. Diferencias en los resultados de NDVI para el sitio en estudio, según la época de análisis (a) época seca correspondiente al mes de marzo del año 2021, (b) época lluviosa correspondiente al mes de julio del año 2020 y (c) simbología para interpretación de las secciones (a) y (b).

El procesamiento de imágenes permitió identificar rangos de valores de NDVI para dos épocas diferentes que contrastan con la disponibilidad de agua en el suelo y que permitirán asociar los valores de NDVI con productividad mediante la colecta de información dasométrica de campo.

Conclusiones

Se propuso una metodología basada en referencias y en la experiencia de los investigadores.

El tamaño de la parcela de campo (con la mayor área posible) es importante cuando se trabaja simultáneamente con imágenes de satélite.

Para obtener información válida se requiere de sitios de muestreo representativos, con un tamaño de muestra adecuado y con el control de las condiciones ambientales, de manejo y fenológicas.

Con esta metodología se desarrollarán modelos de estimación de productividad en función de los tres índices de vegetación propuestos.

Es importante dominar las técnicas para el desarrollo de modelos de estimación de productividad en función de los tres índices de vegetación estudiados, para cada una de las herramientas utilizadas.

Los modelos desarrollados, deberían ser cuidadosamente validados con el fin de ser un punto de partida para fortalecer la utilización de los sensores remotos en el estudio de la productividad de las plantaciones forestales y así ayudar a disminuir los costos en los que incurren los productores en dichos estudios.

Se prevé que, para obtener datos robustos para la toma de decisiones, se deben tomar mediciones en los diferentes estados fenológicos de la especie, a mediano o largo plazo para considerar fenómenos climáticos como El Niño, La Niña, efectos del cambio climático, entre otros.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración financiera de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a través del proyecto “Implementación de tecnologías y aplicaciones de bajo costo para el estudio de la fisiología de especies arbóreas del trópico mesoamericano como herramienta para su conservación” (2020-2021). Se agradece a la Dirección de Posgrado del TEC por la beca otorgada a la primera autora.

Se agradece a la empresa Panamerican Woods por sus aportes en esta investigación.

Se agradece al CONARE por la beca CeNAT-CONARE otorgada a la primera autora para realizar este proyecto.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses respecto a la publicación de este artículo corto.

Referencias

- [1] M. Acosta-Mireles, J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra, «Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México,» *Agrociencia*, vol. 36, n° 6, pp. 725-736, 2002.
- [2] C. M. S. Aquino y J. G. B. Oliveira, «ESTUDO DA DINÂMICA DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) NO NÚCLEO DE SÃO RAIMUNDO NONATO-PI.,» *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, vol. 16, n° 2, pp. 157-168, 2012.
- [3] H. Arce y A. Barrantes, «La madera en Costa Rica: situación actual y perspectivas,» FONAFIFO, ONF, 2006.



- [4] B. A. Baloloy, C. A. Blanco, G. C. Candido, R. J. L. Argamo-sa, J. B. L. C. Dimalag, L. L. C. Dimapilis y E. C. Paringit, «Estimation of mangrove forest aboveground biomass using multispectral bands, vegetation indices and biophysical variables derived from optical satellite imageries: rapideye, planetscope and sentinel-2,» *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 4, n° 3, pp. 29-36, 2018.
- [5] A. Barrantes y S. Ugalde, «Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2012. Costa Rica,» ONF, Costa Rica, 2013.
- [6] A. Barrantes y S. Ugalde, «Usos y aportes de la madera en Costa Rica. Estadísticas 2019 y Precios 2020,» ONF, Costa Rica, 2019.
- [7] P. S. Beck, G. P. Juday, C. Alix, V. A. Barber, S. E. Winslow, E. E. Sousa y S. J. Goetz, «Changes in forest productivity across Alaska consistent with biome shift,» *Ecology letters*, vol. 14, n° 4, pp. 373-379, 2011.
- [8] L. T. Berner, P. S. Beck, A. G. Bunn, A. H. Lloyd y S. J. Goetz, «High-latitude tree growth and satellite vegetation indices: Correlations and trends in Russia and Canada (1982–2008),» *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 116, n° G1, 2011.
- [9] V. Berrío, J. Mosquera y D. Alzate, «Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión,» *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, vol. 13, n° 1, pp. 28-40, 2015.
- [10] R. De Camino y J. Morales, «Capítulo 3: La teca en América Latina. In de Camino, R.; Morales, J.P. eds. 2013. Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades,» CATIE, FAO, Costa Rica, 2013.
- [11] D. N. Aquino, D., O. C. Da Rocha, M. A. Moreira, A. Dos Santos Teixeira y E. M. De Andrade, «Use of remote sensing to identify areas at risk of degradation in the semi-arid region1,» *Revista Ciência Agronômica*, vol. 49, n° 3, pp. 420-429, 2018.
- [12] L. Dong, H. Du, F. Mao, N. Han, X. Li, G. Zhou y T. Liu, «Very high resolution remote sensing imagery classification using a fusion of random forest and deep learning technique—Subtropical area for example.,» *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 113-128, 2019.
- [13] J. Escandón, B. H. De Jong, S. Ochoa, I. March y M. A. Castillo, «Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos Landsat TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso,» *Investigaciones geográficas*, n° 40, pp. 71-84, 1999.
- [14] G. Galidaki, D. Zianis, I. Gitas, K. Radoglou, V. Karathanassi, M. Tsakiri-Strati y G. Mallinis, «Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, n° 7, pp. 1940-1966, 2017.
- [15] Y. Gao, D. Lu, G. Li, G. Wang, Q. Chen, L. Liu y D. Li, «Comparative analysis of modeling algorithms for forest aboveground biomass estimation in a subtropical region,» *Remote Sensing*, vol. 10, n° 4, p. 627, 2018.
- [16] C. García, D. Montero, M. Soto y J. Valencia, «Estimación de productividad en caña de azúcar desde la percepción remota,» *Análisis Geográficos*, vol. 53, pp. 35-49, 2017.
- [17] D. García, J. Ramón, D. Alzate y J. Palacios, «Dynamics of the Indices NDVI and GNDVI in a Rice Growing in Its Reproduction Phase from Multi-spectral Aerial Images Taken by Drones,» *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change II*, p. 106–119, 2018.
- [18] S. Geng, W. Li, T. Kang, P. Shi y W. Zhu, «An integrated index based on climatic constraints and soil quality to simulate vegetation productivity patterns,» *Ecological Indicators*, vol. 129, n° 108015, 2021.
- [19] S. M. Ghosh y M. D. Behera, «Aboveground biomass estimation using multi-sensor data synergy and machine learning algorithms in a dense tropical forest,» *Applied Geography*, vol. 96, pp. 29-40, 2018.
- [20] G. Giraldeoli y A. Paranhos, «Relação entre as variáveis estruturais do habitat e o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) em três tipos de habitat de cerrado na fazenda Diamante, Coxim, MS,» *Simpósio de geotecnologias no Pantanal*, vol. 1, pp. 341-350, 2006.
- [21] Global Forest Watch, «Breves estadísticas globales y por país,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.globalforestwatch.org/>. [Último acceso: 22 julio 2021].
- [22] A. Huete, K. Didan, T. Miura, E. Rodriguez y L. Ferreira, «Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, p. 195–213, 2002.
- [23] R. Y. U. Jae-Hyun, O. H. Dohyeok y C. H. O. Jaeil, «Simple method for extracting the seasonal signals of photochemical reflectance index and normalized difference vegetation index measured using a spectral reflectance sensor.,» *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 20, n° 7, pp. 969-1986, 2021.
- [24] J. Kim, Y. Ryu, C. Jiang y Y. Hwang, «Continuous observation of vegetation canopy dynamics using an integrated lowcost, near-surface remote sensing system,» *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 264, p. 164–177, 2019.

- [25] T. Long, H. Pan, C. Dong, T. Qin y P. Ma, « Ex-ploring the competitive evolution of global wood forest product trade based on complex network analysis,» *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, vol. 525, pp. 1224-1232, 2019.
- [26] M. Meneses y S. Guzmán, «Productividad y eficiencia en la producción forestal basada en las plantaciones de Pino radiata,» *Bosque*, vol. 21, n° 2, pp. 3-11, 2000.
- [27] F. Montealegre Medina, Evaluación espacio temporal de la productividad agrícola con índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) como herramienta para el ordenamiento territorial. (Tesis de Magister Scientiae en Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas), La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata, 2017.
- [28] E. U. Muller, A. V. Kushlin, T. Linhares-Juvenal, D. Muchoney, S. Wertz-Kanounnikoff y D. Henderson-Howat, «The state of the world's forests: forest pathways to sustainable development,» FAO, 2018.
- [29] R. Murillo, A. Alvarado y J. Verjans, «Concentración foliar de nutrimentos en plantaciones de teca en la cuenca del canal de Panamá.,» *Agronomía Costarricense*, vol. 38, n° 1, pp. 11-28, 2014.
- [30] J. Nichol y L. Sarker, « Improved biomass estimation using the texture parameters of two high-resolution optical sensors,» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, n° 3, pp. 930-948, 2010.
- [31] N. Nuthammachot, A. Askar, D. Stratoulis y P. Wicaksono, «Combined use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improving above-ground biomass estimation,» *Geocarto International*, pp. 1-11, 2020.
- [32] Oficina Nacional Forestal, «Balanza comercial y principales tendencias de las exportaciones importaciones de madera y muebles de madera en Costa Rica, estadísticas 2020,» Oficina Nacional Forestal, San José, Costa Rica, 2021.
- [33] E. Pino, «Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología,» *Idesia (Arica)*, vol. 37, n° 1, pp. 75-84, 2019.
- [34] C. Ramírez-Mesén, «Uso de un vehículo aéreo no tripulado como alternativa para evaluar el estado nutricional de una plantación de Gmelina arborea Roxb, San Carlos, Costa Rica (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Forestal),» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2019.
- [35] F. Rueda, L. A. Peñaranda, W. L. Velásquez y S. A. Díaz, «Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada),» *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 16, n° 1, pp. 25-40, 2015.
- [36] A. L. Tovar, I. A. Lizarazo y N. Rodríguez, «Estimación de biomasa aérea de Eucalyptus grandis y Pinus spp usando imágenes Sentinel1A y Sentinel2A en Colombia,» *Colombia forestal*, vol. 23, n° 1, 2020.
- [37] J. Valdivia Favián, «Índices de vegetación para la estimación de biomasa arbórea en sistemas agrosilvícolas de fincas en Zihuateutla, Puebla, México. Tesis. Facultad de Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva,» 2020. [En línea]. Available: http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/1739/TS_VFJ_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 2021].
- [38] J. Wang, H. Du, X. Li, F. Mao, M. Zhang, E. Liu y F. Kang, «Remote Sensing Estimation of Bamboo Forest Aboveground Biomass Based on Geographically Weighted Regression.,» *Remote Sensing*, vol. 13, n° 15, p. 2962, 2021.
- [39] K. Yawata, T. Yamamoto, N. Hashimoto, R. Ishida y H. Yoshikawa, «Mixed model estimation of rice yield based on NDVI and GNDVI using a satellite image,» *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI*, vol. 1114918, 2019.
- [40] M. Zhang, H. Du, G. Zhou, X. Li, F. Mao, L. Dong y S. He, «Estimating forest aboveground carbon storage in Hang-Jia-Hu using landsat TM/OLI data and random forest model,» *Forests*, vol. 10, n° 11, p. 1004, 2019.
- [41] J. Zhu, Z. Huang, H. Sun y G. Wang, «Mapping forest ecosystem biomass density for Xiangjiang River Basin by combining plot and remote sensing data and comparing spatial extrapolation methods,» *Remote Sensing*, vol. 9, n° 3, p. 241, 2017.
- [42] X. Zhu y D. Liu, « Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series,» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 102, pp. 222-231, 2015.



Sistema de visión hiperespectral para el estudio de especies arbóreas tropicales

Hyperspectral vision system to study tropical species of trees

Arnoldo Ramírez-Jiménez¹, Dagoberto Arias-Aguilar², Juan Carlos Valverde-Otárola³, Nelson Zamora-Villalobos⁴, María Rodríguez-Solís⁵, Ernesto Montero-Zeledón⁶

Ramírez-Jiménez, Arnoldo; Arias-Aguilar, Dagoberto; Valverde-Otárola, Juan Carlos; Zamora-Villalobos, Nelson; Rodríguez-Solís, María; Montero-Zeledón, Ernesto. Sistema de visión hiperespectral para el estudio de especies arbóreas tropicales. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 16-23.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6>.

- 1 Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: aaramirez@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-7090-4465>
- 2 Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: darias@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>
- 3 Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: jcvalverde@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-3181-1346>
- 4 Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: nzamora@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-6242-3725>
- 5 Centro de Investigación en Innovación Forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: maria.rodriguez@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4605-6152>
- 6 Laboratorio de Espectroscopía. Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: emontero@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4545-5805>

Palabras clave

Especies arbóreas; reflectancia; firma espectral; dispositivo electrónico; ecofisiología.

Resumen

La reducida cantidad de estudios que consideran los aspectos ecofisiológicos de las especies de plantas tropicales se debe en parte al costo elevado de la instrumentación. Sin embargo, la revolución tecnológica de la última década ha permitido desarrollar dispositivos electrónicos de bajo costo y que, aunado a los recursos de la inteligencia artificial, permiten obtener mediciones muy precisas. Todo lo anterior con el objetivo de promover una producción sostenible y de asegurar la conservación de ecosistemas. Este trabajo consiste en el desarrollo de un sistema electrónico capaz de adquirir datos espectrales a partir de imágenes del espectro visible de las hojas y procesar su reflectancia y longitud de onda, con la finalidad de analizar variables fisiológicas (tales como concentraciones de clorofila y nitrógeno) de las especies arbóreas tropicales en peligro de extinción.

Keywords

Tree species; reflectance; spectral signature; electronic device; ecophysiology.

Abstract

There is a small number of studies that consider the ecophysiological aspects of tropical plant species, this is due to the high cost of instrumentation. However, the technological revolution of the last decade has made it possible to develop low-cost electronic devices that, and along with the resources of artificial intelligence open the possibility to make very precise measurements. The goal is to foster sustainable production and to ensure the conservation of ecosystems. This work shows the development of an electronic system, as prototype capable of acquiring spectral data from images of the visible spectrum of leaves and processing their reflectance and wavelength, to analyze physiological variables (such as concentrations of chlorophyll and nitrogen) of tropical tree species in danger of extinction.

Introducción

Los bosques tropicales presentes en Costa Rica cuentan con más de 2000 especies arbóreas identificadas, dispuestas en todo el territorio nacional. Una gran cantidad de estas especies han sido poco estudiadas debido al poco financiamiento de investigaciones, el grado de complejidad de los estudios y a que se requiere de múltiples campañas de evaluación de individuos en campo [1].

La caracterización fisiológica de cada especie, permite crear nuevos criterios para el manejo y conservación de los recursos naturales, bosques y su biodiversidad, con el fin de generar el menor impacto posible a los ecosistemas y la sostenibilidad en la obtención de recursos forestales [2]. El estudio de los elementos fisiológicos puede simplificarse y aumentar la precisión en el estudio de las especies, con los análisis ópticos como la firma hiperespectral y la fluorescencia que han mostrado ser únicas para cada especie [3], dichas variables combinadas con los análisis colorimétricos y anatómicos permitirían contar con la información básica para pasar a los estudios a escala geoespacial utilizando imágenes de satélite con bandas hiperespectrales, lo cual facilitaría, por ejemplo, la ubicación y tamaño de las distintas poblaciones de especies arbóreas [4].

El producto de este trabajo se concibe como una herramienta de bajo costo y de uso académico y con potencial para apoyar la investigación en árboles y plantas para las aplicaciones del entendimiento de la ecofisiología tropical, con el fin de conservar y desarrollar sosteniblemente los recursos naturales del país.

Metodología

La investigación tiene un enfoque cuantitativo y las variables a evaluar se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Detalle del enfoque cuantitativo de la investigación.

Variable cuantitativa	Descripción
Reflectancia	Adimensional, expresada en porcentaje, su estimación proviene de la medición de intensidad lumínica y potencia radiada.
Longitud de onda	En unidades de nanómetros. En el rango del espectro visible, con un máximo de hasta los 700 nm.
Bandas hiperespectrales	Con rangos de longitud de onda menores a 700 nm, utilizando una selección de al menos 12 rangos de forma continua.

El tipo de investigación es experimental puesto que requirió de la medición de variables, y los resultados entre grupos son comparados, además se realizó una manipulación intencional de variables independientes. La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Aplicaciones de Ecofisiología y Aplicaciones Ecosistémicas (EcoPlant) de la Escuela de Ingeniería Forestal del ITCR, en un periodo de un año, lapso donde se desarrolló la investigación propuesta y la obtención de resultados.

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron datos de hojas en las siguientes especies tropicales: *Handroanthus ochraceus*, *Switenia macrophylla*, *Dalbergia retusa* y *Zygia longifolia*.

Para cada una de estas especies se colectaron muestras de forma aleatoria de hojas a una altura de 3 metros. Para cada especie se consideraron cinco árboles, de cada uno se colectaron veinte hojas, lo que hace un total de cien muestras de hojas, por especie. Los criterios de selección para la toma de muestras utilizadas en esta investigación consideran que las hojas sean de forma regular, coloración verdosa, sin defectos visibles y limpias.

El desarrollo de la investigación se dividió en tres etapas. La primera etapa consistió en el diseño de un modelo para obtener la firma hiperespectral de la especie a partir de sus hojas, con una precisión mínima del 90%. La segunda etapa se orientó a la construcción de un sistema electrónico de bajo costo para procesar una imagen fotográfica del patrón de difracción de la luz sobre la hoja de un árbol. Finalmente, la tercera etapa se concentró en escoger un modelo de inteligencia artificial que permitiera estudiar características ecofisiológicas de la especie, a partir de la información obtenida en la firma hiperespectral.

La entrada al sistema de visión fue una fotografía de la luz difractada del objeto en estudio en este caso la imagen de cada una de las hojas de las cuatro especies en estudio. Cada imagen se procesó como señal, y se obtuvo únicamente las líneas del espectro de las hojas, que posteriormente se convirtieron a escala de grises y se obtuvo una matriz de píxeles $m \times n$, este arreglo se utilizó para generar un cuadro de líneas, de donde se obtuvo la curva espectral en función de longitudes de onda. Para obtener el modelo de reflectancia se utilizó la técnica de sombras de difracción por medio de la función de distribución de Wigner, esto por su rapidez y practicidad.

Resultados y discusión

Para la obtención de una firma hiperespectral se requiere de la construcción de un cubo de espectros con alta densidad en dimensiones espaciales y espectrales, para este trabajo se utilizó segmentación de píxeles para la obtención de las firmas de cada especie, en la figura 1 se puede visualizar el grupo de funciones espectrales para la especie forestal *Zygia longifolia* obtenida con el dispositivo desarrollado.

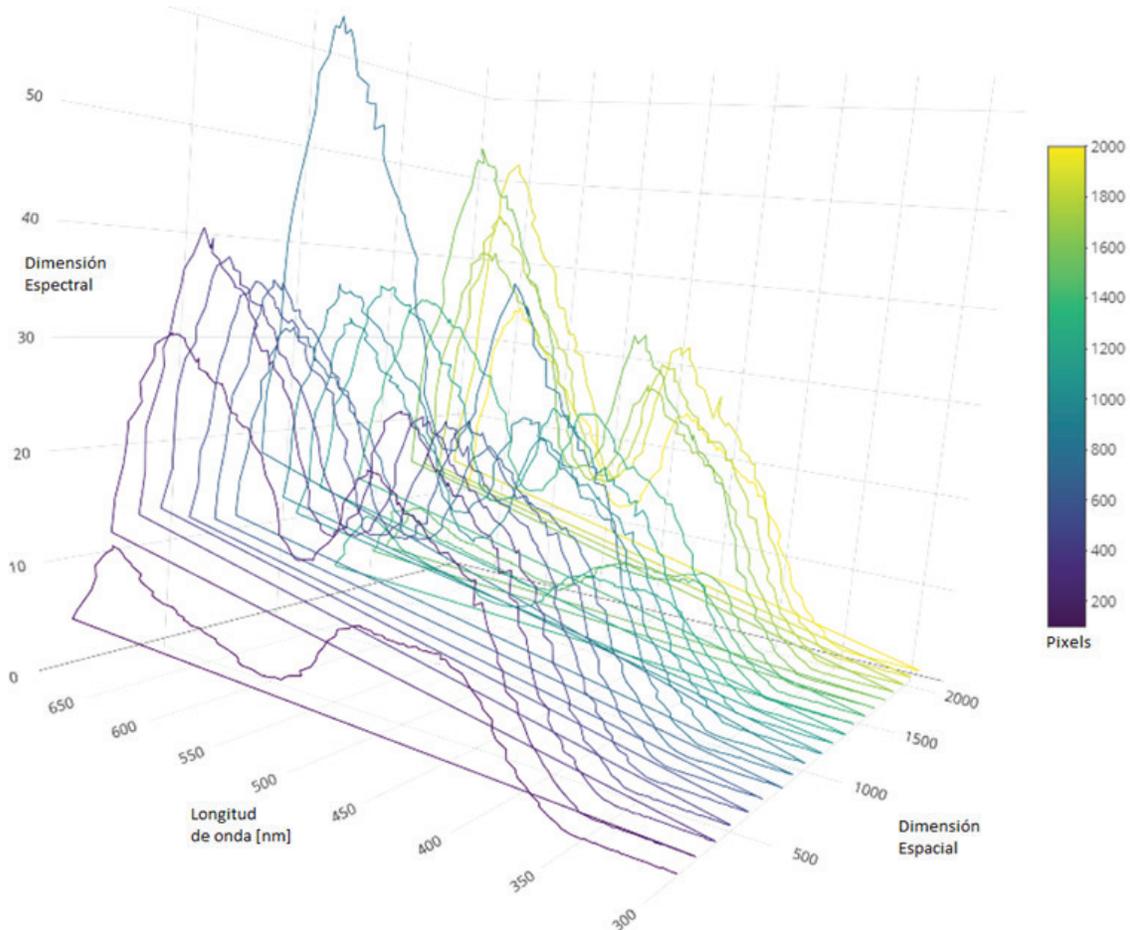


Figura 1. Funciones espectrales para la especie *Zygia longifolia* obtenidas con el dispositivo desarrollado.

En la figura 2 se pueden observar las firmas espectrales obtenidas para *Handroanthus ochraceus*. Las firmas corresponden a las funciones de cada hoja, analizada en un árbol. Por lo que cada imagen contiene 20 firmas espectrales correspondiente a las 20 hojas analizadas.

El resultado de procesar la imagen de la hoja por medio de muestras espaciales y espectrales a través de la técnica de segmentación fue una estructura tridimensional con componentes espaciales (píxeles) y espectrales (reflectancia y longitudes de onda), cada píxel tiene asociado un densa matriz con estimaciones de reflectancia y longitudes de onda, por medio de la factorización y maximización de las funciones matriciales se obtuvieron las firmas espectrales para las cuatro especies en estudio, el análisis estadístico y probabilístico se realiza sobre las matrices obtenidas y se detallan a continuación para cada especie.

En la figura 3 se pueden observar las firmas espectrales obtenidas para la especie *Zygia longifolia*, bajo el mismo procedimiento y en donde se notas las diferencias en los valores de reflectancia de ambas especies y particularmente a partir de los 750 nm.

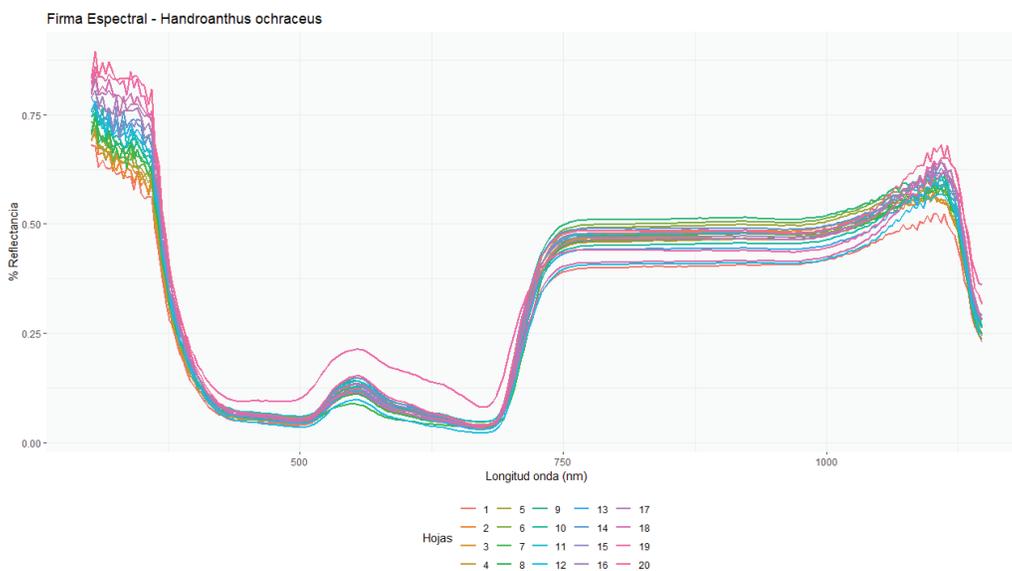


Figura 2. Firmas hiperespectrales para la especie *Handroanthus ochraceus* obtenidas con el dispositivo desarrollado.

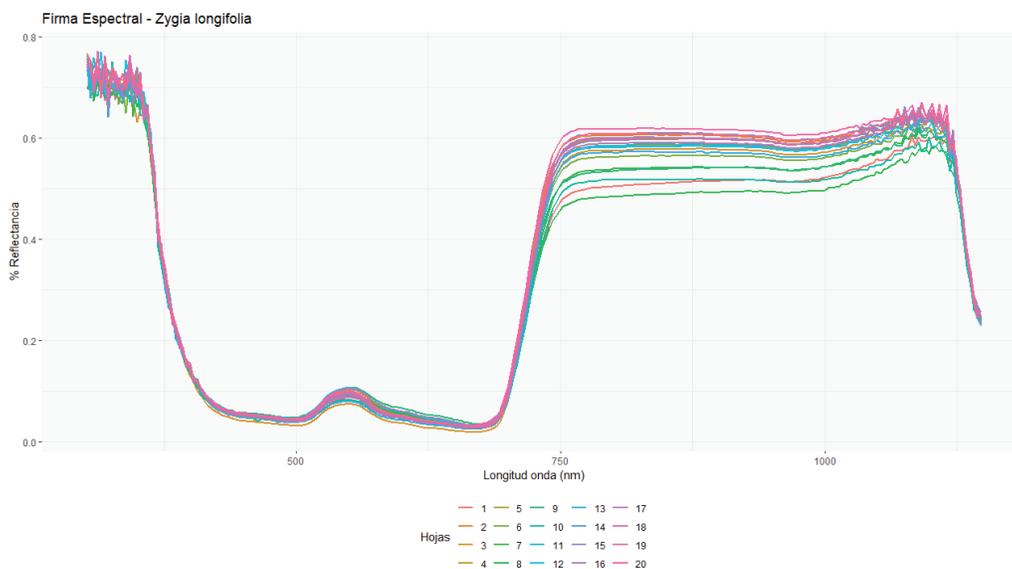


Figura 3. Firmas hiperespectrales para *Zygia longifolia* obtenidas con el dispositivo desarrollado.

Para obtener un marco de referencia de las estimaciones realizadas en el sistema electrónico, se procedió a comparar los resultados de la firma con un equipo comercial, en este caso se utilizó el instrumento Unispec-DC de PPP Systems. A continuación se pueden observar las curvas que contrastan las firmas espectrales obtenidas con el sistema desarrollado que se le ha dado el nombre de SpectraTEC versus el sistema comercial. En importante aclarar que las firmas estimadas, solo contemplan el rango del espectro visible, es decir hasta los 700 nm.

Adicionalmente las firmas obtenidas presentaron variaciones en la reflectancia, que se pueden visualizar como fluctuaciones o ruido en las curvas. Obsérvese cada una de las imágenes mostradas en la figura 4 y figura 5.

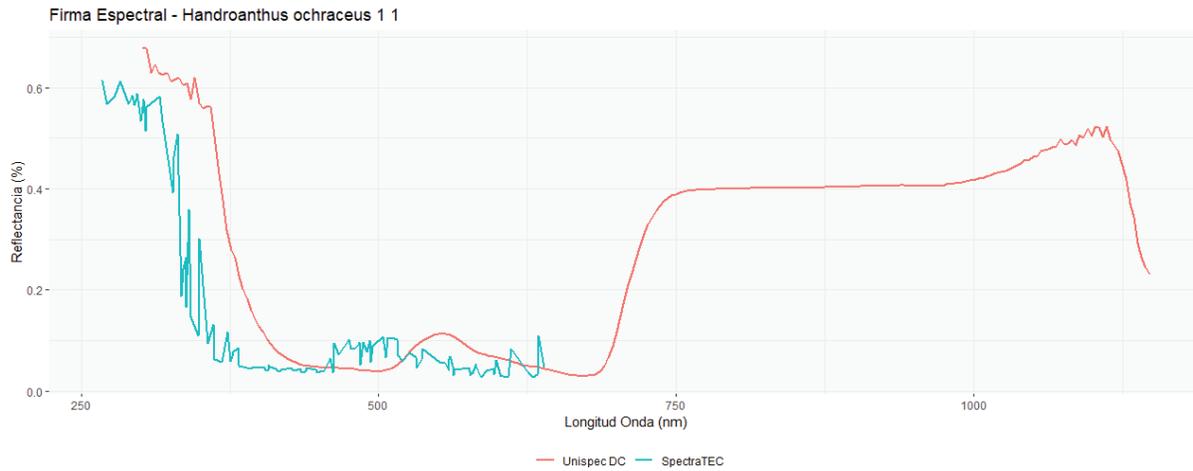


Figura 4. Comparación de las mediciones entre el dispositivo desarrollado SpectraTEC y el UNISPEC para la especie *Handroanthus ochraceus*.

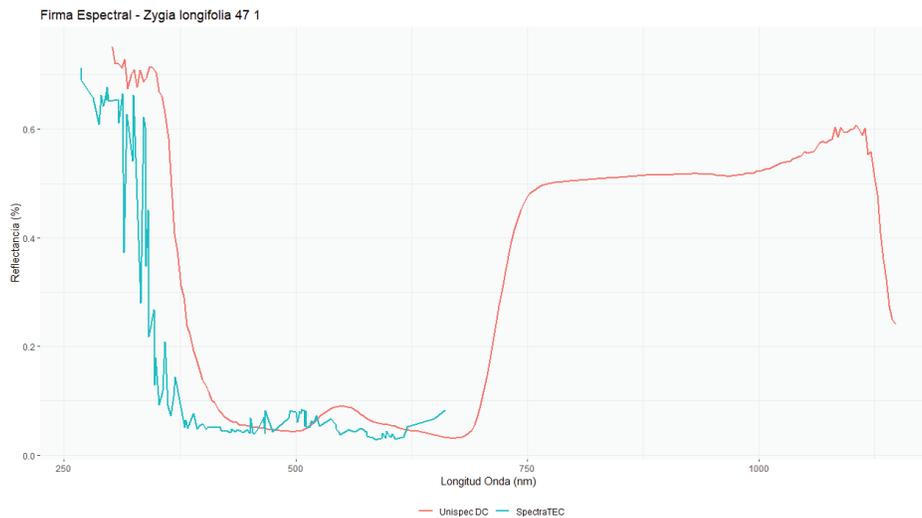


Figura 5. Comparación de las mediciones entre el dispositivo desarrollado SpectraTEC y el UNISPEC para la especie *Zygia longifolia*.

Para cada una de las especies estudiadas se procedió a promediar y normalizar los datos para obtener la curva de mejor ajuste de cada firma, adicionalmente por medio de filtros bilaterales se realizó una regresión para obtener la ecuación característica de cada firma espectral. Obsérvese la línea de mejor ajuste para cada una de las imágenes mostradas en la figura 6 y figura 7.

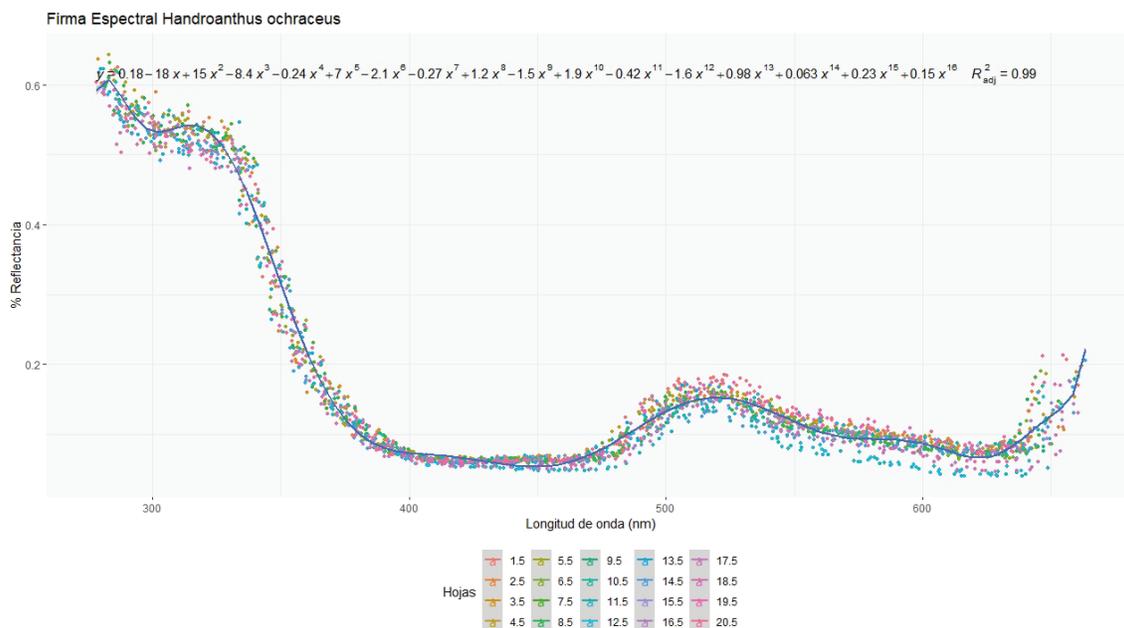


Figura 6. Curva de mejor ajuste - Firma Espectral – con todos los datos para la especie *Handroanthus ochraceus* obtenidos con el dispositivo desarrollado.

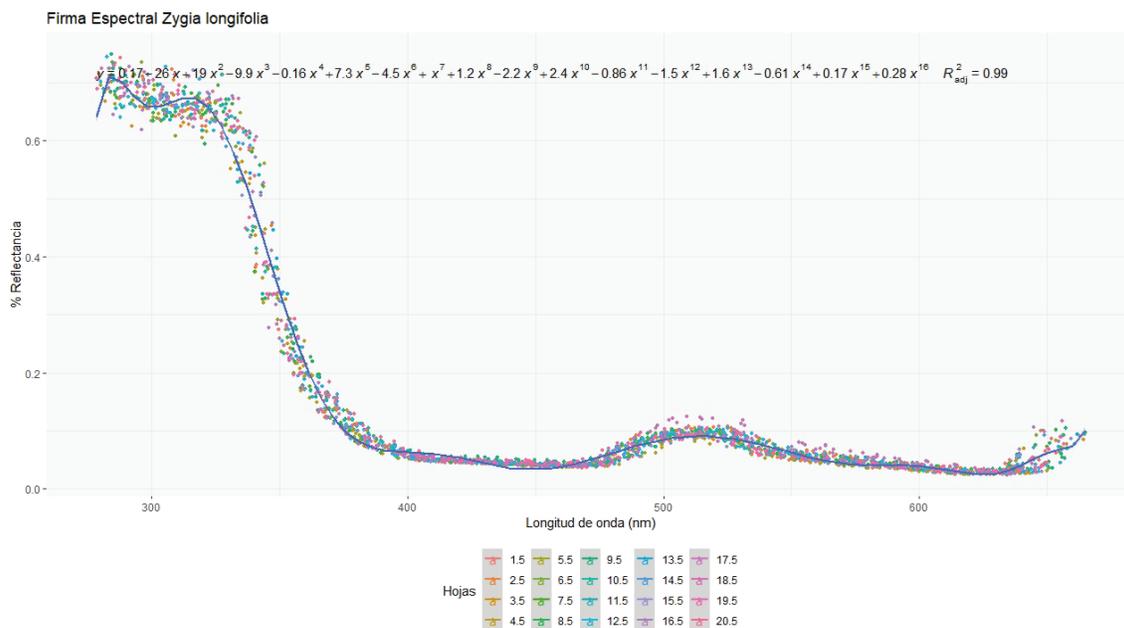


Figura 7. Curva de mejor ajuste - Firma Espectral – con todos los datos para la especie *Zygia longifolia* obtenidos con el dispositivo desarrollado.

Como se pudo observar, el dispositivo desarrollado cumplió el objetivo de generar los valores de reflectancia a lo largo del segmento de longitudes de onda que el patrón de difracción ofrece como salida. La comparación con los resultados del dispositivo comercial, permitieron corroborar que sí es posible realizar mediciones de reflectancia a partir del análisis de patrones de difracción por medio del procesamiento digital de imágenes en hojas de especies forestales.

Conclusiones

La firma espectral de las especies no presenta variaciones significativas en mediciones de reflectancia en diferentes puntos de la superficie foliar. Esto se debe a que la reflectancia es obtenida a partir de la intensidad lumínica, por lo tanto, el factor preponderante en la técnica es la intensidad de luz reflejada proveniente de la hoja.

El porcentaje de precisión promedio final de la reflectancia obtenida en el dispositivo es de 90.03% utilizando un filtro bilateral para mantener los bordes de la curva definidos, este tipo de filtro permitió eliminar ruidos sin suavizar la curva de reflectancia, adicionalmente se implementó un reescalamiento sobre la imagen obtener mejor resolución sobre la imagen.

La precisión para las mediciones de longitud de onda de la curva de reflectancia resultó de 95%, esto se logra al mejorar la luminosidad sobre la muestra, y aumentar la resolución de la imagen, delimitando el área de interés para la red de difracción. La luminosidad sobre la muestra debe ser homogénea, uniformemente distribuida sobre la hoja, adicionalmente los mejores resultados se obtuvieron a 800 lúmenes.

El dispositivo desarrollado y la precisión de las mediciones constituyen una poderosa herramienta portátil y de bajo costo para la toma de mediciones por parte de productores,

La obtención, procesamiento y análisis de firmas hiperespectrales a partir del desarrollo de sistemas empotrados de bajo costo representa una poderosa herramienta para la conservación y desarrollo sostenible de especies forestales, ya que facilita a investigadores, estudiantes y profesionales en el campo del manejo de los recursos naturales la toma de decisiones sobre productividad de cultivos y la sustentabilidad de la producción.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración financiera de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, a través del proyecto “Implementación de tecnologías y aplicaciones de bajo costo para el estudio de la fisiología de especies arbóreas del trópico mesoamericano como herramienta para su conservación” (2020-2022). Se agradece también al programa de la maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción del TEC.

Referencias

- [1] J. I. Del Valle Arango, “Consideraciones estructurales de los bosques de guandal del pacifico sur colombiano,” *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellin*, vol. 53, no. 2, pp. 1011–1042, 2000.
- [2] Brown, Patrick H and Saa, Sebastian and Johnson, Scott and Tian, Shengke, “Foliar Fertilization with Zinc: From Field Trials to Elemental Transport,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 113, no. 200, 2012.
- [3] A. Tero, M. Akiyama, M. Kawasaki, Y. Nishiura, and Y. Yamaguchi, “Theta-alpha EEG phase distributions in the frontal area for dissociation of visual and auditory working memory,” *Sci. Rep.*, vol. 7, p. 42776, 2017.
- [4] G. Owomugisha, E. Nuwamanya, J.A. Quinn, M. Biehl and E. Mwebaze, “Early detection of plant diseases using spectral data,” pp. 1-6.

Mapas interactivos: una herramienta para el análisis exploratorio de datos ético

Interactive maps: a tool for ethical exploratory data analysis

Cristina Soto-Rojas¹

Soto-Rojas, C. Mapas interactivos: una herramienta para el análisis exploratorio de datos ético. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 24-31.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6232>

1 Maestría en Computación, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Asistente de Investigación en el Centro Nacional de Alta Tecnología, San José, Costa Rica; Correo electrónico: csoto@cenat.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9180-1628>

Palabras clave

Mapas interactivos; ética; análisis exploratorio de datos; leaflet; R.

Resumen

Al iniciar el análisis exploratorio de datos de un nuevo proyecto, por lo general revisamos la estructura de las variables, la distribución, varianza, realizamos pruebas de normalidad, pero ¿estamos revisando si son éticos?. No siempre se corrobora que los datos no caigan en algún tipo de discriminación, y muchas veces tampoco es fácil verificar esto. Se propone el uso de mapas interactivos para la verificación de posibles sesgos geospaciales en los datos, como un agregado al análisis exploratorio de los datos, para evaluar ese aspecto ético.

Keywords

Interactive maps; ethic; exploratory data analysis; leaflet; R.

Abstract

When starting the exploratory data analysis of a new project, we usually review the structure of the variables, the distribution, variance, we perform normality tests, but are we checking if they are ethical? It is not always corroborated that the data does not fall into some kind of discrimination, and many times it is not easy to verify this either. The use of interactive maps is proposed to verify possible geospatial biases in the data, as an addition to the exploratory analysis of the data, to evaluate this ethical aspect.

Introducción

El análisis exploratorio de datos (AED) es una técnica estadística utilizada en la primera parte del trabajo estadístico con un conjunto de datos nuevo [1]. Consiste en explorar los datos, analizando la estructura que tienen las variables, indagando la distribución que pueden seguir variables numéricas, buscando posibles patrones, entre otras técnicas que dependen del tipo de datos. No existe una guía puntual establecida, sin embargo, la gran mayoría permiten conocer las variables, observar posibles patrones existentes en los datos y así establecer hipótesis que luego se confirmarán o rechazarán con los métodos estadísticos aplicados a los datos posterior al AED.

Esta técnica es bastante popular y utilizada como fase inicial de investigación estadística, desde modelos sencillos, hasta modelos de inteligencia artificial. Es decir, este método es la base de muchos de los trabajos de investigación desarrollados hoy en día, que tienen impacto directo en nuestra sociedad. Por lo general, dentro de este AED se evalúa si los datos tienen algún tipo de inconsistencia, datos faltantes o alguna variable atípica, pues los modelos estadísticos pueden ser sensibles a este tipo de situaciones. Incluso se han creado herramientas como JENGA-A, por Schelter et al. [2] que permite evaluar el impacto de estas situaciones en los modelos, pues no siempre es posible controlar todos los errores en los datos, especialmente cuando hablamos de modelos en tiempo real.

Sin embargo, es importante ahora evaluar si con ese mismo afán en todos los casos se busca controlar que los datos sean éticos. Así como los errores en los datos van a tener un impacto directo en los resultados del modelo, los sesgos en los datos van a tener un impacto directo también. No son casos aislados en los que se ha reportado que un modelo tiene sesgo, por

ejemplo, [3] nos habla sobre el impacto de datos con un sesgo racial por años de historia con discriminación racial y el impacto que esto tiene en los modelos que ahora usen esos datos para la ayuda con toma de decisiones, decisiones que perpetúan esos sesgos.

Veamos ahora cómo nos pueden ayudar los mapas interactivos. Roth [4] realiza un amplio análisis sobre los mapas interactivos, enfocado a los fundamentos de la cartografía y la interactividad que tienen los mapas con los usuarios, recordando todo lo que los mapas pueden proveer a los usuarios que los utilizan. Luego, Andrienko et al. [5] nos expone un ejemplo del uso de mapas interactivos para el análisis de variables geospaciales y cómo estas herramientas abren nuevas posibilidades de exploración de datos, y nos permiten ir más allá. Los mapas interactivos han sido muy desarrollados, pues son múltiples las aplicaciones que los utilizan día a día, por ejemplo, Waze, Google Maps, Uber, entre otras.

Ahora, más allá de esos usos, Adrienko [6] nos comenta sobre el uso para el análisis exploratorio, específicamente a través de una herramienta llamada DESCARTES, que buscaba ayudar al usuario, indistintamente de si era cartógrafo o no, a analizar datos con referencias geospaciales, para poder utilizar esto en el AED. Se le brindaba al usuario interactividad para que pudiera así explorar y establecer sus dudas de investigación o patrones. Podemos ver un ejemplo en la figura 1.

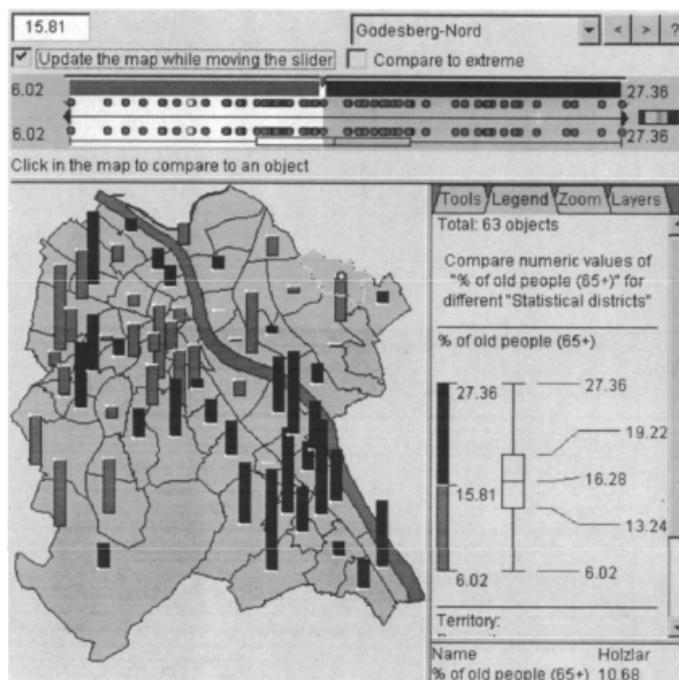


Figura 1. Ejemplo de uso de la Interfaz DESCARTES.

Note. Ejemplo de aplicación DESCARTES para ver las edades en los distintos distritos de Bonn. Tomado de *Interactive maps for visual data exploration*, por [6].

Considerando esta herramienta que puede ser de gran utilidad, analicemos cómo puede apoyarnos en el análisis ético que deseamos hacer. Como se mencionó anteriormente, existe múltiples ejemplos de diferentes sesgos que han sido evidenciados en muchos modelos estadísticos utilizados para facilitar la toma de decisiones. Existen sesgos raciales, de género, de clases, entre otros y el origen de ellos son los datos que son utilizados para entrenar a estos modelos.

Saiph [7] y las demás expositoras mencionan la importancia de considerar la evaluación ética de los modelos estadísticos en todas las etapas, desde el AED, hasta la etapa final, pues en cada una de ellas existe el riesgo de caer en sesgos. Es claro que no podemos eliminar por completo el sesgo en los datos y los modelos, pues el mundo sigue siendo un mundo lleno de sesgos, pero podemos intentar minimizarlo.

Y los mapas interactivos pueden darnos una perspectiva geoespacial que no siempre es tan evidente si revisamos los datos crudos o con otro tipo de visualizaciones, pues un mapa interactivo nos permitirá realizar ciertas comparaciones y evaluaciones entre las variables numéricas o categóricas de nuestros datos y la ubicación geoespacial de esos resultados, lo cual puede ayudarnos a identificar patrones que evidencien algún sesgo.

Metodología

A continuación se presenta una propuesta del uso de un mapa interactivo para el análisis exploratorio ético de los datos. El caso propuesto se realizó utilizando dos capas geoespaciales:

- **Capa Casas Culturales:** esta capa es del Ministerio de Cultura y Juventud de Costa Rica y provee la localización geográfica de las casas culturales en el país.
- **Capa Índice de bienestar de niños y adolescentes:** esta capa es del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) y muestra el índice de bienestar de niños y adolescentes a nivel distrital.

Ambas capas fueron extraídas del Sistema Nacional de Información Territorial [8] de Costa Rica. El objetivo de analizar ambas capas es evaluar si existe algún tipo de sesgo en la ubicación de las casas culturales y si realmente analizar los rendimientos que tienen estas casas permite determinar el aporte que hacen a la población de niños y adolescentes de forma equitativa.

Para la implementación de este gráfico se utilizó la herramienta R, que permite la elaboración de mapas interactivos con ayuda del paquete Leaflet [9]. Se le dio tratamiento a ambas capas ajustando la proyección geográfica para que calzara con la base de OpenStreet que Leaflet permite utilizar. La capa del índice de bienestar era una capa de polígonos que contenía la información del índice para cada cantón. Mientras que la capa de las casas culturales era una capa de puntos que presentaba información extensa sobre los contactos, miembros y ubicación de cada casa cultural.

Posterior a esto se utilizaron herramientas de Leaflet para fusionar ambas capas. Se seleccionó una gama de colores naranjas para representar el índice, de forma que entre más claro se veía el cantón, más bajo era el índice, para que esto fuera observable con la capa verde claro de OpenStreet y para resaltar una región se escogió un tono azulado para contrastar al naranja. Para los puntos se seleccionó un tono vino que fuera un poco complementario al naranja, pero notorio y permitiera contrastar con la capa verde de OpenStreet.

Resultados y discusión

A continuación la visualización del mapa interactivo obtenida.

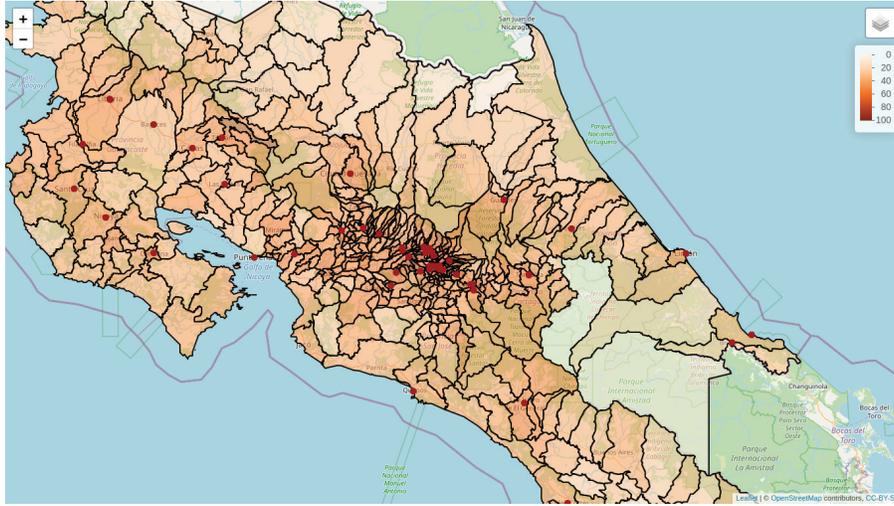


Figura 2. Visualización propuesta. Nota: Visualización inicial al usuario del mapa interactivo.

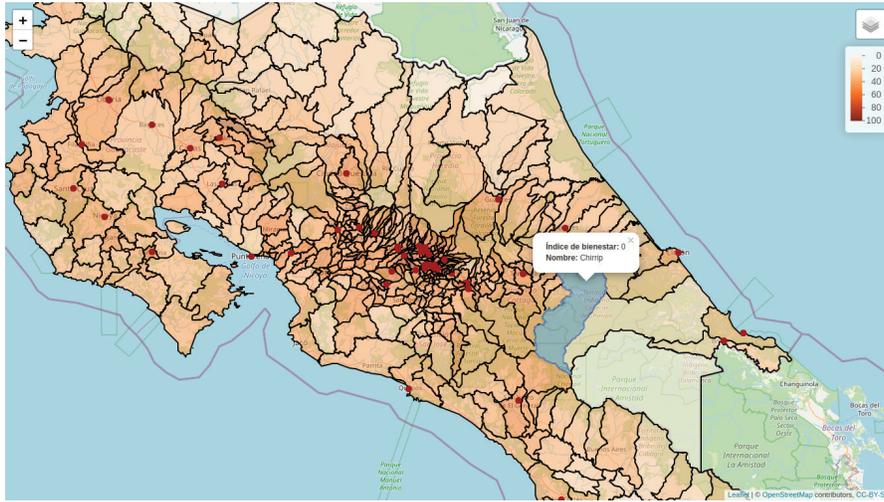


Figura 3. Visualización de un cantón. Nota: Selección de un cantón y muestra de información asociada.



Figura 4. Visualización de una casa cultural. Nota: Selección de una casa cultural y muestra de información asociada.

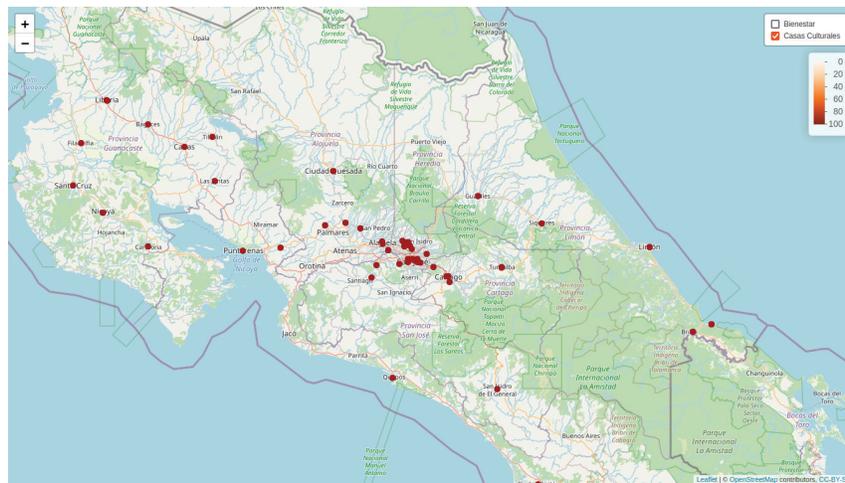


Figura 5. Visualización de capas individuales. Nota: Selección de la capa de casas culturales.



Figura 6. Visualización de capas individuales. Nota: Selección de la capa de índice de bienestar individual.

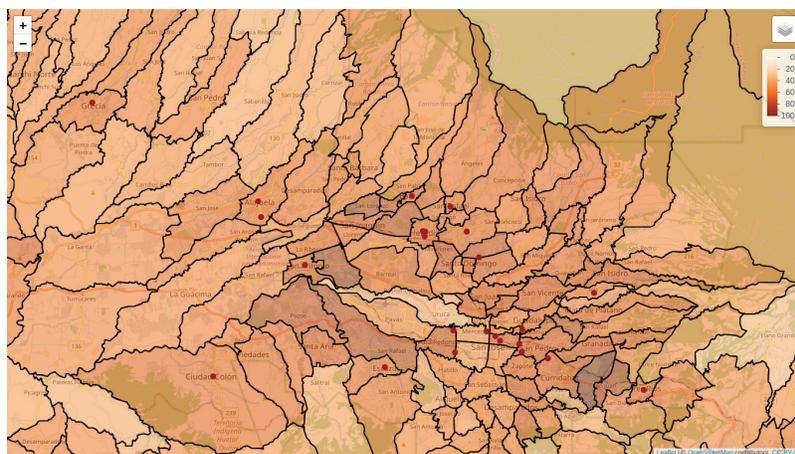


Figura 7. Uso de herramienta de zoom. Nota: Posibilidad de zoom sobre el mapa.

Como podemos notar en las visualizaciones, las casas culturales se encuentran bastante concentradas en la zona central del país, y en zonas más claras, es decir con índice de bienestar menor, como en la zona norte, podemos observar prácticamente nula presencia de casas culturales. Entonces, con solo esta visualización podemos empezar a notar un patrón geoespacial que nos muestra que puede existir un sesgo en la ubicación de estas casas culturales.

Entonces, si por ejemplo, analizamos el impacto de las casas culturales en el índice de bienestar de niños y adolescentes, no podemos asegurar con certeza que ese impacto es igual en todas las regiones del país. Más bien esta visualización abre la puerta a hacer propuestas sobre una distribución más equitativa de las mismas, es decir, de llegar a las manos indicadas, esta visualización nos ayudaría a promover eliminar un sesgo, que tal vez no estaba claro directamente de los datos crudos.

El análisis geoespacial de los datos nos da una visión de los datos que es difícil de obtener a través de otras visualizaciones, nos permite analizar variables sobre los datos acompañadas de la dimensión espacial, que puede llegar a transmitir esa información que deseamos compartir diferente. Además, los mapas interactivos permiten también modelar variables temporales y ver la evolución temporal del mapa. Es decir, podemos en una misma visualización evaluar tiempo, espacio y otras variables de nuestro interés de forma clara y amigable con el usuario. Es una herramienta que puede aportar mucho valor al AED.

Es importante recordar, que no siempre una crítica de sesgos es bien recibida, existen muchas empresas o entidades que quieren que estos sesgos se sigan promoviendo, o simplemente no les interesan, entonces es importante conocer que esta realidad existe, no para desanimarnos, si no para motivarnos a hacer nuestro trabajo de la forma más ética posible dentro de nuestras capacidades.

Consideraciones que podemos tener para velar por esto son: indagar sobre el origen de nuestros datos y si fueron tomados, por ejemplo, a poblaciones variadas; compartir el origen de nuestros datos si generamos datos abiertos y la forma en que fueron recolectados; evaluar el alcance que tienen nuestras aplicaciones generadas y si están alcanzando todas las poblaciones deseadas o solo algunas. Finalmente, velar porque el producto que estamos generando realmente tiene como propósito mejorar la calidad de vida humana.

Conclusiones

El análisis exploratorio de datos es una herramienta utilizada en muchísimas investigaciones estadísticas, y es de gran utilidad para detectar patrones, conocer los datos con los que se trabajará y establecer preguntas de investigación, es una parte que se aconseja seguir replicando. Sin embargo, se recomienda ampliar el análisis también al área ética.

Una de las opciones recomendada para ese AED ético, cuando los datos lo permitan, es uno acompañado de un mapa interactivo, cruzando las diferentes capas, para analizar si en los datos existe algún sesgo que no se está viendo de forma clara. Este tipo de análisis nos permite visualizar la información de una forma diferente y explorar según nuestro interés, por lo que provee más información para poder detectar estos sesgos.

En un futuro se planea explorar la creación de una herramienta que ya contenga diversas capas geoespaciales con metadatos generales, en la que el usuario pueda cargar su capa, cruzarla con otras capas y explorar, para que así pueda realizar un AED geoespacial y ético de una forma más amigable. Además se desea que contenga ejemplos como el presentado para ilustrar la importancia de este tipo de análisis.

Referencias

- [1] J. T. Behrens, (1997). Principles and procedures of exploratory data analysis. *Psychological Methods*, 2(2), 131.
- [2] S. Schelter, T. Rukat, & F. Biessmann. (2021). JENGA-A Framework to Study the Impact of Data Errors on the Predictions of Machine Learning Models. In *EDBT* (pp. 529-534).
- [3] J.J. Avery. (2019). An uneasy dance with data: Racial bias in criminal law. *S. Cal. L. Rev. Postscript*, 93, 28.
- [4] R.E. Roth. (2013). Interactive maps: What we know and what we need to know. *Journal of Spatial Information Science*, 2013(6), 59-115.
- [5] G. Andrienko, N. Andrienko, & V. Gitis. (2003). Interactive maps for visual exploration of grid and vector geo-data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(5-6), 380-389.
- [6] G. Andrienko, & N. Andrienko. (1999). Interactive maps for visual data exploration. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(4), 355-374.
- [7] Ética & Inteligencia Artificial. Taller RIIAA 2020. https://www.youtube.com/watch?v=_erf6xVFRG4
- [8] SNIT. (20 de abril de 2021) <https://www.snitcr.go.cr/>
- [9] Leaflet (1 de abril de 2021) <https://rstudio.github.io/leaflet/>

Bioprospección de microorganismos de la zona Norte de Cartago con potencial de biocontrol de enfermedades postcosecha en cebolla (*Allium cepa*)

Bioprospecting microorganisms from the North of Cartago with potential for biocontrol of postharvest diseases in onion (*Allium cepa*)

Karla Aymerich-Picado¹, William Watson-Guido²,
Jaime Brenes-Madríz³, William Rivera-Méndez⁴

Aymerich-Picado, K; Watson-Guido, W; Rivera-Méndez, W. Bioprospección de microorganismos de la Zona Norte de Cartago con potencial de biocontrol de enfermedades postcosecha en cebolla (*Allium cepa*). *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 32-39.

<https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6233>

- 1 Centro Investigación en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: karla.aymerich@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-9864-3850>
- 2 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: wwatson@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2704-5159>
- 3 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jabrenes@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2325-8808>
- 4 Escuela de Biología, Insituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: wirivera@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2065-6264>

Palabras clave

Antagonismo; antibiosis; control biológico; postcosecha.

Resumen

Esta investigación se enfocó en la búsqueda de una alternativa biológica para el control de enfermedades postcosechas en cebolla, para ello se aislaron 18 microorganismos de la superficie de la cebolla en fincas ubicadas en la zona Norte de Cartago, Costa Rica y se evaluó su capacidad de antibiosis contra los patógenos postcosecha *Penicillium* spp. y *Pseudomonas cepacia* como organismos modelos usando los métodos de cultivo dual e inhibición del crecimiento diferido. Se obtuvo que solo siete de los microorganismos aislados presentaron algún tipo de antibiosis contra los patógenos. Las bacterias tuvieron porcentajes de inhibición diferidas entre 28 y 44%, mientras que los hongos mostraron valores inferiores al 32%. Los aislamientos bacterianos se identificaron molecularmente como bacterias del género *Pseudomonas* sp, mientras que el hongo H2, que mostró mayor porcentaje de inhibición fue identificado como *Trichoderma* sp. Los cuatro aislamientos identificados molecularmente son potenciales antagonistas para biocontrol de enfermedades postcosecha en cebolla. Además, al haber sido aislados de la superficie de cebolla tiene mayores ventajas en campo que otros antagonistas que no hayan sido aislados del microbioma natural del cultivo.

Keywords

Antagonism; antibiosis; biological control; postharvest.

Abstract

This study aimed to search a biological alternative for the control of postharvest diseases in onions, for this, 18 microorganisms were isolated from the onion surface in farms located in the North of Cartago, Costa Rica. Their antagonistic activity was tested against postharvest pathogens *Penicillium* spp. and *Pseudomonas cepacia* as model organisms using dual culture and deferred growth inhibition methods. There were only seven of the microorganisms isolated with some type of antibiosis against the pathogens. Bacteria had deferred inhibition percentages between 28 and 44%, while fungi showed values lower than 32%. Bacterial isolates were molecularly identified in the genera *Pseudomonas* sp, while the fungus H2, which showed a higher percentage of inhibition, was identified as *Trichoderma* sp. The four molecularly identified isolates are potential antagonists for onion postharvest biocontrol. Furthermore, having been isolated from the onion surface, it has greater advantages in the field than other antagonists that have not been isolated from the natural microbiome of the crop.

Introducción

La cebolla (*Allium cepa* L) es un cultivo importante en Costa Rica, siendo la tercer hortaliza más cultivada y comercializada [1]. En la etapa final de su producción, se puede perder hasta un 30% del cultivo total debido a enfermedades postcosecha causadas por hongos y bacterias [2].

Actualmente, la industria de cebolla utiliza métodos físicos y químicos para evitar el desarrollo de patógenos postcosecha. En el primer caso, se usan mecanismos naturales (secado al sol), los cuales son poco eficientes, y artificiales (hornos), cuyo costo económico es alto, y disminuye la calidad del bulbo. Mientras que para los tratamientos químicos se utilizan fungicidas, los

cuales pueden generar efectos negativos en la salud del ser humano y en ambiente [3], y pueden ser motivo de rechazo para la exportación si no se cumplen con los límites de residuos químicos o si el agroquímico está prohibido por reglamentación [4].

Un abordaje novedoso es utilizar técnicas biológicas para la protección postcosecha, el cual usa biocontrol con microorganismos para la disminución de enfermedades causadas por fitopatógenos. A diferencia de las otras alternativas usadas en el mercado, esta posee las ventajas de ser una tecnología de bajo costo, y amigable para el ambiente [5]. No obstante, las investigaciones relacionadas a la etapa postcosecha en cebolla son escasas, solo se reporta la utilización de tres hongos: *Trichoderma harzianum* y *T. viride* en el control de *Botrytis alli* y el uso de *Penicillium spp* para el control de *Aspergillus niger* [6], [7], [8].

La búsqueda de nuevos microorganismos biocontroladores que permitan una solución real a los agricultores debe estar dirigido al desarrollo de un prototipo comercial. Para ello, en las primeras etapas de investigación es clave estudios con especies nativas de microorganismos aislados de la superficie del cultivo a tratar. Esto supone una ventaja en la colonización y supervivencia del organismo, lo que puede aumentar el éxito del tratamiento [9].

El objetivo principal de este trabajo fue aislar microorganismos de la superficie de la cebolla en fincas ubicadas en la zona Norte de Cartago en Costa Rica y evaluar su capacidad de antibiosis contra enfermedades postcosecha usando a *Penicillium spp.* y *Pseudomonas cepacia* como fitopatógenos modelo.

Metodología

Obtención de muestras de bulbos y hojas de cebolla

Se tomaron muestras de hojas y bulbos de dos fincas ubicadas en Llano Grande de Cartago. Para ello se seleccionaron las hojas externas de cuatro bulbos provenientes de campo, y el tallo de cuatro bulbos que se encontraban en las carpas de secado, se empaquetaron en bolsas con cierre hermético, y se pusieron en una hielera hasta su procesamiento.

Aislamiento y purificación de microorganismos

Se pesó 1g de tejido, y se maceró en 9 ml de agua destilada estéril en un tubo Falcon de 50 ml. Seguidamente, se tomó 1ml del líquido del macerado y se sembró por extensión en placas (9 cm de diámetro) con 20 ml de medios Agar Papa Dextros (PDA) acidificado (2% v/v ácido láctico) y Agar Nutritivo (AN), para el aislamiento de bacterias y hongos, respectivamente. Las placas se incubaron por dos días en el caso de las bacterias y cuatro días para los hongos 27 °C. Luego, se tomó cada colonia de las placas y se sembraron a 27 °C por separado en PDA o AN hasta obtener un cultivo puro.

Selección inicial de bacterias y hongos

Las bacterias obtenidas en la purificación se sometieron a la prueba de tinción Gram y se observaron al microscopio (100X). En el caso de los hongos, aplicó la tinción con azul de lactofenol para determinar su morfología al microscopio (40x). Se clasificaron los hongos por género basados en el manual Barnett & Hunter [10]. Después de ello, se eliminaron hongos patógenos reportados por Granados [2] y las bacterias con morfología de coco.

Pruebas de antibiosis

Se realizaron pruebas de antagonismo *in vitro* por triplicado en contra de los patógenos *Penicillium sp* y *P. cepacia*. En el caso de las pruebas de hongos contra *Penicillium sp* se utilizó una modificación de la metodología implementada por Astorga et al. [11]. Este cambio consistió en poner 50 µl de la solución de esporas del patógeno (concentrada a 1×10^7 conidios/ml) a 1.5 cm del borde de una placa Petri de 9,0 cm de diámetro y en el extremo contrario en línea recta se sembró una alícuota con 50 µl de la solución de esporas del potencial antagonista (concentrada a 1×10^7 conidios/ml) a 1.5 cm del borde de la placa. Para los aislamientos clasificados como *Penicillium sp*, se modificó la distancia entre el extremo de la placa y la alícuota por 3 cm debido a la lentitud del crecimiento. Todas las pruebas se incubaron a 27 °C por nueve días. El último día del ensayo se midió el porcentaje de inhibición radial, aplicando fórmula usada por Astorga et al. [11]:

$$PICR = \frac{(\text{diámetro de control patógeno} - \text{diámetro patógeno tratamiento}) * 100}{\text{diámetro del control patógeno}}$$

En las pruebas contra *Pseudomonas cepacia* se utilizó una modificación de la metodología desarrollada por Moran et al [12]. Para ello, se preparó un cultivo de 24 horas ($OD_{600}=0,3-0,4$) de los aislamientos bacterianos y se sembró 25 µl en el centro de una placa Petri (9 cm de diámetro) con Agar Nutritivo. Seguidamente, se dejó secar en cámara de flujo laminar por 40 minutos, y después se dejó crecer por 24 horas a 27°C. Al finalizar el tiempo de incubación se asperjó dos veces con cultivo líquido de *P. cepacia* ($OD_{600}=0,3-0,4$) y se dejó secar en cámara de flujo laminar por diez minutos. Al terminar este proceso, las placas fueron incubadas a una temperatura de 27°C por 48 horas. Para los aislamientos fúngicos, se realizó el mismo proceso, pero usando una solución de esporas (1×10^7 conidios/ml) para la inoculación en el centro de la placa. Al terminar la aspersion del patógeno, se dejó incubando por 5 días a 27°C.

Al finalizar las pruebas, se calculó el porcentaje de inhibición diferida (PID) usando la fórmula usada por Moran et al [12]:

$$PID = \frac{(\text{Diámetro total inhibición} - \text{Diámetro de microorganismo}) * 100}{\text{Diámetro total inhibición}}$$

Identificación molecular

Se extrajo el ADN de dos aislamientos bacterianos y un hongo los cuales mostraron el mayor porcentaje de inhibición contra los dos patógenos. En el caso de bacterias se usó el kit comercial The Wizard® Genomic DNA Purification Kit, según el protocolo del fabricante y para el hongo se implementó el protocolo usado por Watson [13]. El ADN obtenido fue almacenado a -70°C para análisis posteriores. La cuantificación y pureza del ADN extraído se obtuvo en el equipo NanoDrop™ Lite Spectrophotometer, donde se seleccionaron las muestras con una relación 260/280 entre los valores 1,8-2,0. Mientras que la integridad se determinó en un gel de agarosa al 1,5%(m/v) a un voltaje de 80 V por 30 min.

A partir del ADN extraído se amplificaron las regiones 16 S del ADN ribosomal aplicando la técnica de PCR usando el equipo Applied Biosystems Veriti™ thermal cycler. En el caso de bacterias se utilizaron los primers 534R (5'-ATTACCGCGGCTGCTGG-3') y 341F (5'-CCTACGGGAGGCAGCAG-3), y con el siguiente programa: un ciclo de 95 °C durante 1 min, 30 ciclos de 95°C durante 1 min, de 54 °C durante 1 min y de 70 °C durante 3 min; por último, un ciclo de 72 °C durante 8 min. Para el ADN de hongos se usó los primers ITS-1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCG G-3') y ITS-4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3'), con el

programa de termociclado: un ciclo de 95 °C durante 1 min, 30 ciclos de 95°C durante 1 min, de 55 °C durante 1 min y de 70 °C durante 3 min; por último, un ciclo de 72 °C durante 8 min. Al terminar los productos de PCR fue almacenados a -70°C para análisis posteriores.

La calidad de los productos se determinó en un gel de agarosa al 1,5%, voltaje de 80V por 30 min. Una vez que se observó una única banda clara en el producto de PCR, se mandó a secuenciar a Psomagen Inc, y los resultados se compararon con secuencias genéticas utilizando la base de datos del GenBank del National Center for Biotechnology Information (NCBI) y la herramienta BLAST para su alineamiento.

Análisis estadístico

Se realizó un ANOVA para determinar la diferencia estadística entre medias de los aislamientos en los resultados de antibiosis usando el programa estadístico Minitab 19.1.1.

Resultados y discusión

Aislamiento e identificación

Se obtuvieron 18 aislamientos bacterianos y fúngicos, en ambas fincas, sin embargo, después de la identificación y filtrado se eliminaron 10 microorganismos. Se conservaron los hongos identificados mediante microscopía óptica en los géneros *Penicillium* y *Trichoderma* debido a que existe evidencia previa como biocontroladores en enfermedades postcosecha en cebolla [6], [8]. En el caso de las bacterias, se conservaron todos los aislamientos ya que previamente se han utilizado en formulaciones postcosechas en hortalizas como papa, camote y vainica [14], [15]. En el cuadro 1 se presenta un resumen de los microorganismos finales:

Cuadro 1. Aislamientos provenientes de hojas de budo de cebolla de la zona Norte de Cartago.

Código	Procedencia	Tipo microorganismo	Identificación morfológica al microscopio
B1	Campo	Bacteria	Cocobacillus
B2	Campo	Bacteria	Cocobacillus
B3	carpa	Bacteria	Cocobacillus
B4	carpa	Bacteria	Bacillus
H1	Campo	Hongo	Trichoderma
H2	Carpa	Hongo	Trichoderma
H4	Carpa	Hongo	Penicillium
H5	Campo	Hongo	Penicillium

Pruebas de antibiosis

Los resultados de antibiosis mostraron que solo siete de los aislamientos tuvieron algún tipo de antibiosis ante *P. cepacia* y *Penicillium sp.* Lo anterior implica que estos microorganismos produjeron algún metabolito antimicrobiano que disminuyó el crecimiento o actividades metabólicas de los fitopatógenos usados [16]. En el cuadro 2 se detalla los valores obtenidos para cada aislamiento:

Cuadro 2. Resumen de pruebas antibiosis de potenciales antagonistas ante los patógenos *Penicillium sp* y *P. cepacia*.

Código	<i>Penicillium</i> (% inhibición diferida, % inhibición radial*)	<i>Pseudomonas</i> (% inhibición diferida)
B1	38.12 ± 2.82 a	35.26 ± 8.62 a,b
B2	34.39 ± 9.90 a,b	28.20 ± 11.56 b,c
B3	NI**	44.05 ± 6.89 a
H1	9.95 ± 3.28* d,e	15.41 ± 4.46 c
H2	24.72 ± 4.59* b,c	32.50 ± 7.35 a,b
H3	5.77 ± 5.89* e	NI**
H4	18.58 7.46*c,d	NI**

*Medias con la misma letra en la misma columna no son significativamente diferente según la prueba LSD de Fisher ($p < 0,005$)

**No mostró inhibición

Las bacterias fueron los aislamientos que mostraron la mayor inhibición del crecimiento ante los patógenos, ya que los valores obtenidos estuvieron en un rango entre 28 y 44%. Su identificación a nivel molecular coincidió con el género *Pseudomonas sp*, las cuales ya han reportado especies con capacidad de antibiosis ante patógenos postcosecha. Por ejemplo, *Pseudomonas fluorescens* ha sido usado exitosamente en bioformulaciones para cultivos de papa [17]. Además, las cepas SC-10 ESC-11 de *Peudomonas syringae* son el ingrediente activo de BioSave™, único formulado comercial postcosecha para aplicaciones en hortalizas (papa y camote) [18].

Los hongos mostraron la menor inhibición (menor al 30%) en comparación a las bacterias, no obstante, el aislamiento H2 tuvo la particularidad de ser estadísticamente igual a la bacteria con mayor inhibición (B1) en frente *P. cepacia*. El hongo H2 fue identificado molecularmente del género *Trichoderma*, según los alineamientos de BLAST, y con un 98.50 % de identidad con la especie *Trichoderma asperellum*, la cual ha sido reportado previamente en literatura como antagonista del patógeno poscosecha de cebolla: *Aspergillus niger* en condiciones *in vivo* [19].

La capacidad de antibiosis no es lo único que se debe de tener al escoger el antagonista, ya que su interacción con el patógeno afecta también a la composición del microbioma del bulbo y hojas [20]. Uno de los efectos que podría ser negativo a la cebolla si un antagonista es aislado de otros cultivos es la eliminación de los microorganismos benéficos del microbioma, ya que estos podrían ayudar al control de otros patógenos. Por tanto, los aislamientos de *Pseudomonas sp* y *T. asperellum* al ser aislados del microbioma natural, disminuyen las posibilidades de afectar de forma negativa al microbioma y por tanto posee un mayor potencial de eficacia para el control de enfermedades postcosecha [21].

Conclusiones

La composición del microbioma de las hojas de cebolla está compuesta por una diversidad de bacterias y hongos benéficos. Algunos de los microorganismos tienen potencial para disminuir las enfermedades postcosecha de cebolla.

Los aislamientos bacterianos del género *Pseudomonas sp*, y el aislamiento de *Trichoderma asperellum* tuvieron la mayor capacidad de producción de compuestos antimicrobianos ante los patógenos *Penicillium sp* y *P. cepacia*. Además, al haber sido aislado de la superficie de la



hoja de la cebolla posee mayores ventajas ante otros antagonistas que no hayan sido aislados del microbioma natural del cultivo. No obstante, para verificar su eficacia como una alternativa para los agricultores se debe evaluar su capacidad de biocontrol en experimentos sobre bulbos de cebolla en campo y el desarrollo de escalamiento y bioformulación de una o el conjunto de todos los microorganismos.

Referencias

- [1] K. López-Courrau, W. Rivera-Méndez, J. Brenes-Madriz y C. Zúñiga-Vega, "Establecimiento de un protocolo para el crecimiento y multiplicación de *Setophoma terrestris* y *Fusarium* spp. provenientes de un cultivo de cebolla (*Allium cepa* L)", *Revista Tecnología en Marcha*, 2018. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i4.3958>
- [2] M. Granados, Ed. *Problemas fitosanitarios de la cebolla en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica, 2011.
- [3] M. K. Bansal, G. E. Boyhan y D. D. MacLean, «Effect of postharvest chemical treatments, heat curing, and refrigerated storage on marketability of short-day onions», *HortTechnology*, vol. 28, n.º 2, pp. 129–135, 2018. <https://doi.org/10.21273/horttech03903-17>
- [4] P. Kusstatscher, T. Cernava, A. Abdelfattah, J. Gokul, L. Korsten y G. Berg, "Microbiome approaches provide the key to biologically control postharvest pathogens and storability of fruits and vegetables", *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 96, n.º 7, 2020. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa119>
- [5] M. Aamir *et al.*, "Microbial bioformulation-based plant biostimulants: a plausible approach toward next generation of sustainable agriculture", en *Microbial Endophytes*, Elsevier, 2020, pp. 195–225. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819654-0.00008-9>
- [6] I. Khokhar, M. S. Haider, I. Mukhtar y S. Mushtaq, "Biological control of *Aspergillus niger*, the cause of Blackrot disease of *Allium cepa* L. (onion), by *Penicillium* species", *Journal of Agrobiolgy*, vol. 29, n.º 1, pp. 23–28, 2012. <https://doi.org/10.2478/v10146-012-0003-5>
- [7] V. Kumar, S. S. Neeraj y N. A. Sagar, "Post Harvest Management of Fungal Diseases in Onion - A Review.", *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 4, n.º 6, pp. 737–752, 2015.
- [8] N. Santiago, B. Roderos y G. F., "Santiago, N., Roderos, B., & Gallema, F. (2018). Management of pre and postharvest diseases in bulb onions through *Trichoderma harzianum* rifai utilization", *Asian Journal of Postharvest and Mechanization*, vol. 1, n.º 1, pp. 81–92, 2018.
- [9] M. Reyes-Estebanez *et al.*, "Characterization of a native *Bacillus velezensis*-like strain for the potential biocontrol of tropical fruit pathogens", *Biological Control*, vol. 141, p. 104127, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104127>
- [10] H. L. Barnett y B. B. Hunter, *Illustrated Genera of Imperfect Fungi*, 4ª ed. American Phytopathology Society Press., 1998.
- [11] K. Astorga-Quirós, K. Meneses-Montero, C. Zúñiga-Vega, J. Brenes-Madriz y W. Rivera-Méndez, "Evaluación del antagonismo de *Trichoderma* sp. y *Bacillus subtilis* contra tres patógenos del ajo", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 27, n.º 2, p. 82, 2014. <https://doi.org/10.18845/tm.v27i2.1929>
- [12] J. C. Moran, E. L. Crank, H. A. Ghabban y M. J. Horsburgh, «Deferred Growth Inhibition Assay to Quantify the Effect of Bacteria-derived Antimicrobials on Competition», *Journal of Visualized Experiments*, n.º 115, septiembre de 2016. Accedido el 2 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3791/54437>
- [13] W. Watson, "Caracterización molecular y bioquímica de mutantes M3 de arroz (*Oryza sativa indica* L. VAR. CR5272) en condiciones de estrés salino.", Tesis maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2019.
- [14] Y. Li, Y. Cai, Y. Liang, P. Ji y L. Xu, "Assessment of antifungal activities of a biocontrol bacterium BA17 for managing postharvest gray mold of green bean caused by *Botrytis cinerea*", *Postharvest Biology and Technology*, vol. 161, p. 111086, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111086>
- [15] D. Spadaro y S. Droby, "Development of biocontrol products for postharvest diseases of fruit: The importance of elucidating the mechanisms of action of yeast antagonists", *Trends in Food Science & Technology*, vol. 47, pp. 39–49, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.003>
- [16] J. Köhl, R. Kolnaar y W. J. Ravensberg, "Mode of Action of Microbial Biological Control Agents Against Plant Diseases: Relevance Beyond Efficacy", *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845>

- [17] M. Vatankhah, R. S. Riseh, M. M. Eskandari, E. Sedaghati, H. Alaei y H. Afzali, "Biological control of fusarium dry rot of potato using some probiotic bacteria", *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 21, n.º 5, pp. 1301–1312, 2019.
- [18] J. A. Anderson, J. Staley, M. Challender y J. Heuton, "Safety of *Pseudomonas chlororaphis* as a gene source for genetically modified crops", *Transgenic Research*, vol. 27, n.º 1, pp. 103–113, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11248-018-0061-6>
- [19] B. K. Prajapati y R. K. Patil, "Bio-Efficacy of *Trichoderma* Spp. And its Liquid Culture Filtrate on Mycelial Growth and Management of Onion Black Mould Rot (*Aspergillus niger*) *in Vitro* and *in Vivo*", *Indian Phytopathology*, vol. 70, n.º 1, 2017. <https://doi.org/10.24838/ip.2017.v70.i1.48989>
- [20] C. Sánchez-Cañizares, B. Jorrín, P. S. Poole y A. Tkacz, "Understanding the holobiont: the interdependence of plants and their microbiome", *Current Opinion in Microbiology*, vol. 38, pp. 188–196, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.07.001>
- [21] M. d. C. Orozco-Mosqueda, M. d. C. Rocha-Granados, B. R. Glick y G. Santoyo, "Microbiome engineering to improve biocontrol and plant growth-promoting mechanisms", *Microbiological Research*, vol. 208, pp. 25–31, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.01.005>



Crecimiento y desarrollo inicial de *Musa textilis* Née y su interacción con las especies maderables *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* y *Dipterix panamensis* en Costa Rica

Growth and initial development of *Musa textilis* Née and its interaction with the timber species *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* and *Dipterix panamensis* in Costa Rica

Mónica Araya-Salas¹, Dagoberto Arias-Aguilar², Juan Carlos Valverde-Otárola³, Kevin Arias-Ceciliano⁴, Jesús Mora-Molina⁵

Araya-Salas, M; Arias-Aguilar, D; Valverde-Otárola, J.C; Arias-Ceciliano, K; Mora-Molina, J. Crecimiento y desarrollo inicial de *Musa textilis* née y su interacción con las especies maderables *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* y *Dipterix panamensis* en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 40-49.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6234>

- 1 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: moaraya@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3075-6103>
- 2 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: darias@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>
- 3 Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Chile. Correo electrónico: jcvalverde@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3181-1346>
- 4 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: arias.kevin@yahoo.com
 <https://orcid.org/0000-0001-9911-4515>
- 5 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jmora@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2309-1940>

Palabras clave

Agroforestería; *Musa textilis*; SPAD; *Cordia alliodora*; *Hieronyma alchorneoides*; *Dipteryx panamensis*.

Resumen

Musa textilis conocida en Costa Rica y otros países como abacá, es una especie de la familia Musaceae que ha sido cultivada comercialmente por su capacidad para producir fibra de calidad industrial. Un factor clave para la economía rural de Costa Rica es aumentar la productividad y calidad de la fibra, optimizando los costos de manejo y cosecha. El presente trabajo busca generar resultados válidos del efecto positivo de la interacción de árboles maderables en un arreglo agroforestal con el abacá, con especial interés en el efecto posterior que generará la sombra en el crecimiento de todas las especies y en la calidad de la fibra. En la literatura existen pocos estudios que analicen el valor de la interacción del cultivo de abacá con árboles en términos de su crecimiento y desarrollo fisiológico. Por tanto, en este estudio se presentan los resultados preliminares del efecto del sombreado de tres especies maderables nativas sobre el crecimiento del abacá. Para este propósito, se hicieron mediciones mensuales de crecimiento (diámetro y altura total) y de desarrollo fisiológico con mediciones SPAD. La hipótesis es que existe efecto positivo significativo (incremento) en el crecimiento y desarrollo del cultivo en asocio con especies maderables, mostrando diferencias significancias a largo plazo entre tratamientos. En general, se encontró que sí existen diferencias significativas entre el crecimiento en altura para las plantas establecidas en asocio con especies maderables y las plantas testigo.

Keywords

Agroforestry; *Musa textilis*; SPAD; *Cordia alliodora*; *Hieronyma alchorneoides*; *Dipteryx panamensis*.

Abstract

Musa textilis known in Costa Rica and another countries as abaca, is a species of the Musaceae family which has been commercially cultivated for its ability to produce industrial quality fiber. A key factor for the rural economy of Costa Rica is to increase the productivity and quality of the fiber and to optimize management and harvesting costs. The present work seeks to generate valid results on the positive effect of the interaction of timber trees in an agroforestry arrangement with abaca, with special interest in the future effect of shade on the growth of all species and on fiber quality. In the literature there are few studies that analyze the value of the interaction of the abaca crop with trees in terms of their growth and physiological development. Therefore, this study presents preliminary results of the effect of shading by three native timber tree species on the growth of abaca. For this purpose, monthly measurements of growth (diameter and total height) and physiological development were made SPAD measurements. The hypothesis is that there is a significant positive effect (increase) in the growth and development of all species established with shade, showing significant differences in the long term in each of the shading treatments. In general, it was found that there are significant differences between the growth in height for the plants established in association with timber species and the control plants.

Introducción

A nivel fisiológico las respuestas y adaptaciones manifestadas por las plantas dependen en gran medida tanto de la magnitud de los cambios a los que se sometan según la variación de los recursos disponibles en su entorno [1] [2]; así como de las características propias de la especie [3].

Situaciones como eventos críticos de estrés hídrico y de radiación solar directa extrema en donde se da un déficit hidrológico en el ambiente (déficit de presión de vapor), provoca que se generen reducciones en las tasas de crecimiento por causa de pérdidas de turgencia [4]; como en el área foliar neta, ya que se produce un desbalance entre la transpiración y absorción de agua [5], así como de la tasa de fotosíntesis [6]; lo cual, provoca cambios en los niveles de reflectancia [7].

Una forma de lidiar con esa situación es mediante la modificación del entorno de crecimiento o microclima [8]. En relación a ello, existen estudios que afirman que al aplicarse un sombreado se potencia el rendimiento y la productividad de los cultivos, como en abacá con coberturas artificiales del 50% [9], café con sombra viva de 15-60% de cobertura [10], cacao [11], entre otros. En contraposición, se ha reportado que al aplicar sombreado, se afecta directamente la fisiología original de los cultivos involucrados, debido a que la reducción de la radiación fotosintética activa absorbida puede llegar a compensarse según el aumento en la eficiencia del uso de la luz, disminuyendo la productividad neta entre cada uno de los componentes [11]. En todo caso también influye como la planta redistribuye los productos de la fotosíntesis.

Lazo y Ascencio [12] destacan que el componente ambiental clasificado como sombra percibido por las plantas, se ve determinado por la combinación existente entre la calidad (color/longitud de onda) y cantidad (densidad de flujo fotónico) de radiación. Entonces, al modificar el nivel de exposición a las longitudes de onda de luz es posible aumentar y/o reducir la eficiencia fotosintética según la especie; y por consiguiente el rendimiento [13]. Por lo cual, tener una comprensión básica de la fisiología e hidráulica de las especies, es de suma importancia a la hora de implementar las operaciones de manejo silvícolas pertinentes; ya que, con ello se permite mejorar en gran medida tanto la calidad del producto como la supervivencia de los individuos, proporcionando a su vez un mejor control económico de las inversiones percibidas por los productores [14].

El abacá (*Musa textilis* Née) o Caña de Manila, es una especie perteneciente a la familia Musaceae de tipo agronómico tolerante a la sombra, originario de Filipinas. Estrechamente relacionada al banano, y caracterizado por ser autóctona del sotobosque de las selvas tropicales siempre verdes de Filipinas [15].

Se tienen reportes de que, en Filipinas, aproximadamente el 67% de los productores poseen plantaciones de hasta 0,25 ha; y parte de ellas se asocian con especies como *X. sagittifolium*, *M. esculenta*, *B. oleraceae*, *A. esculentus* y *A. comosus* [16]; así como, con la especie maderable *P. falcataria* intercalada en callejones y setos para maximizar el uso de la tierra [17]. En Indonesia, debido a la dependencia económica a cultivos de coco y durian, se plantan sistemas agroforestales con abacá en espaciamientos que varían entre 4x4 m, 4,5x4,5 m, 5x5 m [18]. Moreno [19] destaca que al plantarse como un monocultivo reporta una productividad por hectárea significativamente menor a ser cultivado en asocio con otras especies de cultivos agronómicos.

A pesar de que es de conocimiento general que la especie es tolerante a la sombra [16], existen muy pocos estudios que determinen el grado de influencia del sombreado sobre el rendimiento y calidad del abacá [9]. Según esto, y teniendo en cuenta la relación sombra-intercepción de luz para poder medir la eficiencia en el crecimiento, Bande *et al.* [9] implementaron la aplicación

de tres densidades de sombreo artificial, en donde se obtuvieron rendimientos superiores al 50% de cobertura. Asimismo, se ha plantado a 2x2 m en asocio con cultivos de cobertura fijadoras de nitrógeno como *Desmodium ovalifolium*, *Centrocema puvecens* y *Calopogonium munocoides*, obteniendo mayores rendimientos cuando estos cultivos se habían establecido antes de plantar el abacá [20]. A pesar de estos reportes, existe un vacío de información muy amplio en el área de la caracterización fisiológica, que determine el grado de influencia de la interacción existente entre los componentes plantados sobre el rendimiento y calidad del abacá [9] en el tiempo.

Por tanto, el objetivo principal del presente trabajo es generar información sobre el efecto de la interacción en el crecimiento y desarrollo fisiológico durante el primer periodo de cosecha de *Musa textilis* Née al asociarse con las especies maderables nativas *Cordia alliodora* (Ruiz y Pav.) Oken, *Dipteryx panamensis* (Pittier) Record y Mell e *Hieronyma alchorneoides* Allemão en sistemas agroforestales de la zona Caribe de Costa Rica. Es de notar que el ensayo fue establecido a finales del mes de octubre del 2020 y las mediciones se iniciaron a partir del mes de febrero del 2021, por lo que se presentan los resultados iniciales de los primeros ocho meses. Las mediciones continuarán hasta la primera y segunda cosecha, momento en donde se analizará la calidad de la fibra.

Metodología

Descripción del sitio y especie

El experimento se llevó a cabo en una finca perteneciente a un productor asociado a la Asociación de Productores de Abacá y Cultivos Agroforestales (ASPA) ubicada en el caserío La Chávez en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10°23'01.6 "N, 83°56 '36.1"W, 68 msnm). El sitio presenta un clima de bosque muy húmedo tropical (bmh-T) [21]; con una precipitación promedio anual de 4062 mm y una temperatura promedio anual de 25,9 °C [22]. En cuanto a las condiciones específicas del sitio, el suelo está clasificado dentro del orden Ultisol y Suborden Humults, [23], con un pH ácido menor a 5,5, una saturación de acidez del 40% y una pendiente muy leve (< 5%).

El ensayo se estableció en dos etapas; primeramente, se sembró el abacá a principios de julio de 2020 con una densidad de 1600 plantas/ha y posteriormente se sembraron los árboles en octubre de 2020 entre las hileras del abacá con una densidad de siembra de 400 árboles/ha. A cada árbol, se le aplicó 40 g de hidrogel Hidrokeeper® para prevenir el déficit hídrico en los meses de enero a abril. Las especies maderables utilizadas para la conformación de los sistemas agroforestales fueron *C. alliodora*, *D. panamensis* y *H. alchorneoides*. La nomenclatura y las autoridades se basan en The Plant List (2013) generada por el Missouri Botanical Garden (www.theplantlist.org).

Previo a la siembra, se realizó un mecanizado uniforme del terreno con una rastra de discos a 60 cm, en la cual se aplicó el equivalente a tres toneladas de carbonato de calcio (CaCO₃) por hectárea como enmienda para reducir la acidez del suelo de manera gradual y llevarla al 10%, evaluada a través de muestreos de suelos. En cuanto a las operaciones silvícolas post-siembra, se realizó una fertilización a los tres y doce meses de edad, con una fórmula NPK (10-30-10) con dosis que varían según el estado nutricional del experimento, evaluado mediante los análisis de suelos. Adicionalmente se realizaron fertilizaciones foliares de complemento con Magic Green. La competencia con arvenses se controló de manera permanente en el área de la rodaja y cada dos meses de manera mecánica con motoguadaña (2,5 Hp de potencia). El paquete de manejo hizo el uso mínimo de plaguicidas.

Diseño experimental

Se aplicó un diseño experimental de bloques completos al azar, con tres bloques y tres tratamientos correspondientes a las especies maderables en estudio y tres repeticiones, respectivamente. Cada parcela está compuesta por 12 árboles y 36 plantas de abacá, y cada árbol se ubica al centro de cuatro plantas de abacá. Adicionalmente, en cada parcela se definió una fila externa de seis plantas de abacá para control.

Tiempo de estudio y condiciones experimentales

Se aplicaron mediciones mensuales en el periodo de febrero a agosto de 2021. El muestreo fisiológico de niveles de clorofila se realizó utilizando un equipo SPAD Minolta, considerando únicamente hojas de la parte intermedia de la copa de los individuos, caracterizados por no poseer defectos o decoloraciones atípicas visibles, así como por no presentar zonas con agua superficial; ya que esto puede provocar distorsiones en los datos. Teniendo siempre presente que las mediciones se aplicaron fuera del área efectiva de la nervadura. Estas mediciones se ejecutaron entre las horas de las 8:00-10:00 y de las 14:00-16:00 (GMT-6 Central América), llevando un control paralelo de las condiciones de temperatura (°C), humedad relativa (%) y luminosidad con el fin de que no se presentara una variabilidad extrema que pudiera afectar de forma directa a la toma de datos.

Asimismo, se evaluó el crecimiento dasométrico de los individuos, mediante la medición del diámetro a 1,30 m y la altura total en el caso de los árboles; y el diámetro a un metro de altura del pseudotallo más grueso de cada cepa de abacá y la altura hasta el punto de inserción de la hoja bandera.

Parámetros fisiológicos evaluados

Se aplicaron cinco mediciones por hoja para tres hojas por individuo, evaluando el contenido relativo de clorofila (SPAD) mediante un medidor SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development), marca Konica Minolta® de área efectiva igual a 5 mm².

Análisis estadístico

Para las variables evaluadas se usaron métodos estadísticos mediante análisis de varianza (ANDEVA). Para ello, se verificó primeramente los supuestos de normalidad de los residuos del análisis mediante una prueba Shapiro-Wilks y de homocedasticidad de las varianzas mediante una prueba de Levene. En caso de corresponder, se aplicaron pruebas de comparación de medias de Tukey. Todo esto, se analizó con una significancia del 95% en el programa Statistica 9.0 [24].

Resultados y discusión

A nivel general, existe una cantidad muy limitada de información respectiva al potencial del uso de sombreado en plantaciones de *M. textilis*, así como de su comportamiento al introducirse en sistemas agroforestales. Es por esta razón, y por los pocos resultados positivos en donde se ha comprobado que el sombreado artificial en este cultivo es funcional para aumentar el crecimiento y calidad de la fibra [25], que se implementó un arreglo agroforestal con el fin de determinar el potencial del asocio para poder maximizar los beneficios económicos y ecosistémicos obtenidos de los componentes. En la figura 1, se destaca el esquema de establecimiento usado para configurar el arreglo agroforestal compuesto por *M. textilis* en interacción con las especies maderables nativas *C. alliodora*, *H. alchorneoides* y *D. panamensis*; en donde se denota que los árboles presentan en el primer año una altura inferior a las plantas de *M. textilis*.



Figura 1. Vista de las especies maderables y su interacción con las plantas de *M. textilis* a los 9 meses de edad en un arreglo agroforestal establecido en Sarapiquí, Costa Rica. A, D: *C. alliodora*; B, E: *H. alchorneoides*; C, F: *D. panamensis*.

En cuanto al crecimiento vertical de las plantas de abacá, se tiene que en los primeros meses se presentó un incremento superior en altura cuando estas plantas se encuentran en asocio con árboles, superando a las plantas control creciendo en un estado sin competencia. En la figura 2, se puede observar que todas las especies propiciaron una tendencia al crecimiento ascendente del abacá; en especial el arreglo de *C. alliodora*, puede deberse al crecimiento más lento propiciado por esta especie maderable.

Solo se denotó una caída en la altura de las plantas de abacá con *C. alliodora* para el mes de julio. Sin embargo, la causa de este comportamiento estuvo asociada a problemas de volcamiento de plantas de abacá por incidencia del roedor *Heterogeomys cherriei* que se alimenta y afecta las raíces, ya que la muestra se redujo drásticamente.

Es de tener en cuenta, que el arreglo agroforestal se estableció en dos etapas; en donde los árboles se plantaron tres meses después a las plantas de *M. textilis*; por lo cual, las interacciones percibidas se deben mayormente a las diferencias en altura (figura 1). Esto justifica, el hecho de que a pesar de que se trata de un sistema compartido de agua y nutrientes, no se haya presentado evidencia de supresión por parte de ninguno de los componentes. A ello se suma, el hecho de que el sistema radicular de los árboles no se encuentra totalmente desarrollado, lo que permitió un buen periodo de adaptación a las plantas de abacá de establecer correctamente su sistema radicular adventicio.

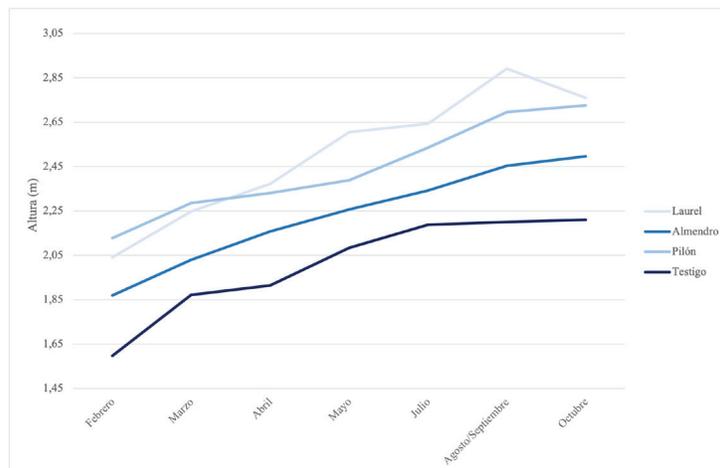


Figura 2. Crecimiento en altura de *M. textilis* en asocio con tres especies de árboles maderables establecidas en un arreglo agroforestal en Sarapiquí, Costa Rica.

Según lo anterior, se determinó que si existen diferencias significativas entre los tratamientos en asocio con árboles y el tratamiento control. Definitivamente la altura de los árboles se ha visto influenciada positivamente por la interacción con las plantas de abacá.

En la figura 3, se muestran los resultados de las mediciones de altura total de las especies arbóreas, destacando la especie *D. panamensis* que presentó un mayor crecimiento en altura con un valor promedio de 3,01 m en el mes de octubre.

Seguidamente resalta el crecimiento mostrado por *H. alchorroides*. Esta condición, puede justificarse con el hecho de que *H. alchorroides* se caracteriza por ser adaptable a condiciones de suelo ácidos, arcillosos y mal drenados [26], por lo cual es probable que no se presentara una condición de alta competencia entre los componentes. En cuanto al tratamiento de *C. alliodora*, se tiene un comportamiento particular, en donde las plantas presentaron un crecimiento regular con una tasa de crecimiento a la mitad, de la especie de más rápido crecimiento (*D. panamensis*).

Esto puede deberse a que según la literatura *C. alliodora* es susceptible al terreno de establecimiento y prefiere sitios fértiles, bien drenados y clima no demasiado seco [27]; por lo cual, pudo darse un estrés inicial, que incidió en un ritmo de crecimiento más lento. Sin embargo, el estado y coloración de las plantas indican buen vigor. Es de tener en cuenta, que las plantas al someterse a ciertos niveles de estrés hídrico o a exceso de acidez, presentan modificaciones en sus mecanismos de ahorro energético, por lo cual se dan casos de desequilibrio en donde tanto la absorción como la transpiración, así como la capacidad fotosintética se ven afectadas, por lo que da como resultado reducciones en el crecimiento y desarrollo de los individuos [2]. En otros casos las plantas bajo estrés hídrico invierten más energía en el desarrollo de sus raíces.

A pesar de las diferencias mostradas en las figuras, no existen diferencias significativas presentadas entre el crecimiento de las especies maderables.

Desde el punto de vista de sanidad, todas las especies arbóreas presentaron un buen estado fitosanitario y no fueron detectadas plagas o insectos que limiten el crecimiento.

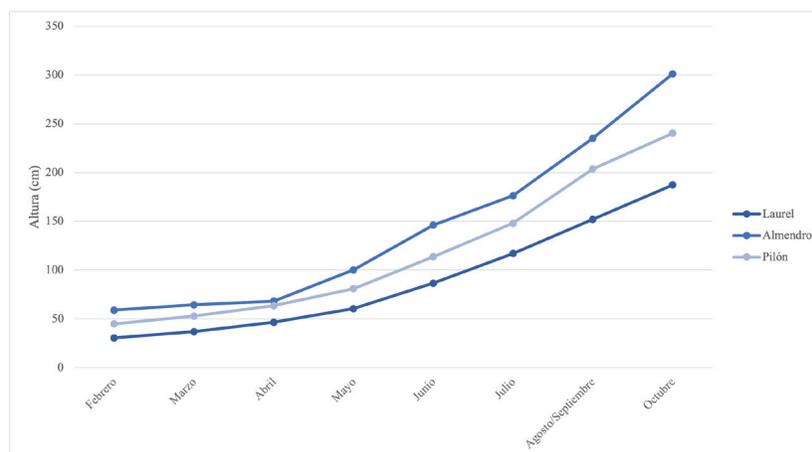


Figura 3. Crecimiento en altura de tres especies maderables usadas en un arreglo agroforestal de *M. textilis* establecido en Sarapiquí, Costa Rica.

En la figura 4, se muestran los valores de clorofila en unidades SPAD obtenidos para cada una de las especies maderables analizadas. Esta variable se utilizó como indicadora del estado de nutrición de los cultivos; ya que este elemento (nitrógeno) se relaciona directamente con la curva de crecimiento del sistema radicular y aéreo de las plantas [28], ya que es una parte estructural de la composición de la clorofila.

Mostró un comportamiento muy variable a lo largo del periodo de medición, en donde destaca un pico de los valores de clorofila en el mes de mayo y un decrecimiento masivo para el mes de junio en todos los tratamientos; siendo *C. alliodora* la especie con el comportamiento más estable, lo que indica que hubo una alteración nutricional en términos de nitrógeno foliar. Relacionado a ello, la única situación ocurrida ha sido el exceso de humedad en el suelo por condiciones de lluvias extremas en la zona de estudios que podría originar anoxia nivel radical.

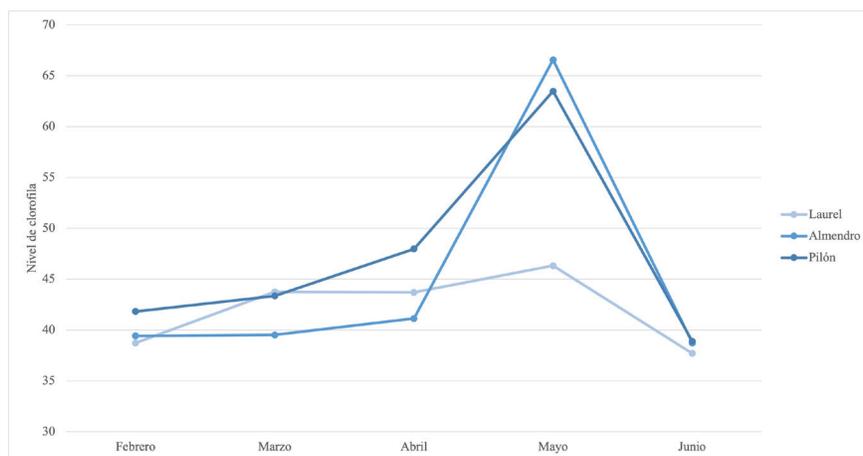


Figura 4. Variación de los niveles de clorofila a lo largo del período de mediciones de un arreglo agroforestal de *M. textilis* establecido en Sarapiquí, Costa Rica.

Conclusiones

El abacá muestra una respuesta inicial muy positiva en el crecimiento inicial del parametro altura cuando se somete a la interacción con árboles maderables. El tratamiento que presentó un mayor estímulo en el crecimiento vertical del abacá corresponde a la especie *H. alchorroides* y la especie maderable con mejor desarrollo en altura fue *D. panamensis*. Las características propias de cada especie y su capacidad de adaptabilidad fueron determinantes en las tendencias de comportamiento para las interacciones de cada tratamiento. Existen diferencias significativas en el crecimiento en altura y en los niveles de nitrógeno obtenidos entre las plantas de abacá testigo y las plantas de abacá en asocio con árboles maderables, en donde las plantas en asocio presentan un mayor desarrollo.

Es importante destacar, que el presente estudio es una primera aproximación a una investigación más detallada de las interacciones generadas en un arreglo agroforestal de *M. textilis* en asocio con especies maderables. Se espera continuar con las mediciones hasta la segunda cosecha de la fibra, para expandir el estudio hacia la calidad de la fibra; y además poder percibir cambios significativos en la dinámica del comportamiento de los componentes, ya que el crecimiento de los árboles sobrepasará al de las plantas de abacá, y generará un efecto de sombra total o parcial que se manifestará en fluctuaciones en las funciones de capacidad fotosintética, transpiración, asimilación entre otros. Asimismo, se presenta la posibilidad de

incursionar más puntualmente en aspectos que incidan indirectamente en la interacción árbol-planta, como lo son la interacción radicular, el manejo silvicultural, el reciclaje de nutrientes y los aspectos ecofisiológicos.

Agradecimientos

Se agradece a la colaboración financiera de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica a través del proyecto “Impulso tecnológico a los sistemas agroforestales para la producción sostenible de fibras naturales para exportación: cultivo de abacá (*Musa textilis* Née) como alternativa versátil para productores rurales en Costa Rica” (2020-2022). El proyecto atiende a la generación de información sobre aspectos de manejo, nutrición, fisiología del cultivo de abacá, caracterización y usos alternativos de las fibras, protocolo de cultivo *in vitro* y capacitación a productores. Se agradece también a la Dirección de Posgrado del TEC por la beca otorgada a la primera autora.

Referencias

- [1] S. Paulus, H. Schumann, H. Kuhlmann y J. León, «High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants,» *Biosystems Engineering*, vol. 121, p. 1–11, 2014.
- [2] J. C. Valverde, D. Arias-Aguilar, E. Montero-Zeledón y D. Gutierrez-Fallas, «Fluorescencia, reflectancia y respuesta fisiológica al estrés hídrico en plántulas de *Gmelina arborea* Roxb.,» *Uniciencia*, vol. 35, n° 1, pp. 320-334, 2021.
- [3] D. L. Moreno Echeverry, D. C. Useche Rodríguez y H. E. Balaguera López, «Respuesta fisiológica de especies arbóreas al anegamiento. Nuevo conocimiento sobre especies de interés en el arbolado urbano de Bogotá,» *Colombia forestal*, vol. 22, n° 1, p. 51–67, 2018.
- [4] J. C. Valverde y D. Arias, «Efectos del estrés hídrico en crecimiento y desarrollo fisiológico de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp,» *Colombia Forestal*, vol. 23, n° 1, p. 20–34, 2020.
- [5] L. Varone, M. Ribas-Carbo, C. Cardona, ... y J. Flexas, «Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis in seedlings and saplings of Mediterranean species pre-conditioned and aged in nurseries: Different response to water,» *Environmental and Experimental Botany*, vol. 75, p. 235–247, 2012.
- [6] L. P. Moreno, «Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión,» *Agronomía Colombiana*, vol. 27, n° 2, pp. 179-191, 2009.
- [7] M. C. Díaz-Barradas, J. B. Gallego-Fernández y M. Zunzunegui, «Plant response to water stress of native and non-native *Oenothera drummondii* populations,» *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 154, p. 219–228, 2020.
- [8] T. Dueck, W. V. Ieperen y K. Taulavuori, «Light perception, signalling and plant responses to spectral quality and photoperiod in natural and horticultural environments,» *Environmental and Experimental Botany*, vol. 121, pp. 1-150, 2016.
- [9] M. B. Bande, J. Grenz, V. B. Asio y J. Sauerborn, «Morphological and physiological response of Abaca (*Musa textilis* var. Laylay) to shade, irrigation and fertilizer application at different stages of plant growth,» *International Journal of AgriScience*, vol. 3, n° 2, pp. 157-175, 2013.
- [10] R. Cerda, C. Allinne, C. Gary, ... y J. Avelino, «Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems,» *European Journal of Agronomy*, vol. 82, pp. 308-319, 2017.
- [11] F. Charbonnier, O. Rouspard, G. Le Maire, ... y A. Clément-Vidal, «Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system,» *Plant, Cell y Environment*, vol. 40, n° 8, pp. 1592-1608, 2017.
- [12] J. V. Lazo y J. Ascencio, «Efecto de diferentes calidades de luz sobre el crecimiento de *Cyperus rotundus*,» *Bioagro*, vol. 22, n° 2, pp. 153-158, 2010.
- [13] F. Casierra-Posada, J. E. Peña-Olmos y C. Ulrichs, «Basic growth analysis in strawberry plants (*Fragaria* sp.) exposed to different radiation environments,» *Agronomía Colombiana*, vol. 30, n° 1, pp. 25-33, 2012.
- [14] J. C. Valverde, D. Méndez y D. Arias, «Efectos del defoliador *Atta cephalotes* Linnaeus. en el crecimiento y el desarrollo fisiológico e hidráulico de árboles juveniles de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones contro-

- ladas.,» *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 44, n° 170, pp. 214-226, 2020.
- [15] M. M. Bande, V. B. Asio, J. Sauerborn y V. Römheld, «Growth Performance of Abaca (Née) *Musa textilis* Integrated in Multi-strata Agroecosystems,» *Annals of Tropical Research*, vol. 38, n° 1, pp. 19-35, 2016.
- [16] C. Lacuna-Richman, «The role of abaca (*Musa textilis*) in the household economy of a forest village.,» *Small-scale forest economics, management and policy*, vol. 1, n° 1, pp. 93-101, 2002.
- [17] R. A. Palma, L. E. Tiongco, O. P. Canencia, y J. Y. Dagonio, «Gall rust disease incidence of Falcata (*Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen) in Falcata – based agroforestry systems in Misamis Oriental,» *IOP Conf-Series: Earth and Environmental Science*, vol. 449, n° 1, p. 012035, 2020.
- [18] M. Nebangka, B. R. Sumayku y J. Pongoh, «Potensi Pengembangan Pisang Abacá (*Musa textilis* Née) di Pulau Karakelang,» *COCOS*, vol. 1, n° 1, 2020.
- [19] L. Moreno, «Economic feasibility of intercropping selected abaca variety with annual crops in flat open lands,» *Philippine Journal of Crop Science*, vol. 19, n° 1, p. 12, 1994.
- [20] R. B. Armezin, M. H. P. Seco, P. S. Caintic y E. J. M. Milleza, «Effect of leguminous cover crops on the growth and yield of abaca (*Musa textilis* Nee),» *Industrial Crops and Products*, vol. 21, n° 3, pp. 317-323, 2005.
- [21] L. R. Holdridge, «Life zone ecology,» IICA, Tropical Science Center, San José de Costa Rica, 1978.
- [22] Climate-data, «Clima: Las Horquetas (Costa Rica).,» Climate-data, 2016. [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/america-del-norte/costa-rica/heredia/las-horquetas-874786/>.
- [23] E. Ortiz y C. Soto, *Atlas Digital de Costa Rica 2014*, Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica., 2014.
- [24] Statsoft, *Statistica (9.0)*, Londres, Inglaterra: Statsoft, 2015.
- [25] M. Bande, *Ecophysiological and Agronomic Response of Abaca (Musa textilis) to Different Resource Conditions in Leyte Island, Philippines [Tesis de doctorado no publicada]*., Stuttgart, Alemania: Institute of Plant Production and Agroecology in the Tropics and Subtropics University of Hohenheim., 2012.
- [26] A. Delgado, M. Montero, O. Murillo y M. Castillo, «Crecimiento de especies forestales nativas en la zona norte de Costa Rica,» *Agronomía Costarricense*, vol. 27, n° 1, pp. 63-78, 2003.
- [27] CATIE, «Laurel (*Cordia alliodora*). Banco de Semillas Forestales,» CATIE, s.f.. [En línea]. Available: <http://bsf.catie.ac.cr/listing/laurel-cordia-alliodora-1965619175.html>. [Último acceso: 12 julio 2021].
- [28] B. Dunn, H. Singh y C. Goad, «Relationship between chlorophyll meter readings and nitrogen in poinsettia leaves,» *Journal of Plant Nutrition*, vol. 41, n° 12, pp. 1566-1576, 2018.

Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales

Advances in research carried out on abaca crops established in Costa Rica with special reference to agroforestry systems

Mónica Araya-Salas¹, Dagoberto Arias-Aguilar², Juan Carlos Valverde-Otárola³, Kevin Arias-Ceciliano⁴, Freddy Muñoz-Acosta⁵, Ana Marlen Camacho-Calvo⁶, Giovanni Garro-Monge⁷, Karol Jiménez-Quesada⁸, Jesús Mora-Molina⁹

Araya-Salas, M; Arias-Aguilar, D; Valverde-Otárola, J.C; Arias-Ceciliano, K; Muñoz-Acosta, F; Camacho-Calvo, A.M; Garro-Monge, G; Jiménez-Quesada, K; Mora-Molina, J. Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Biental Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 50-59.

<https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6235>

1 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: moaraya@estudiantec.cr <https://orcid.org/0000-0002-3075-6103>

2 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: darias@itcr.ac.cr <https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>

3 Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Chile. Correo electrónico: jcvalverde@itcr.ac.cr <https://orcid.org/0000-0002-3181-1346>

4 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: arias.kevin@yahoo.com <https://orcid.org/0000-0001-9911-4515>

5 Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fmunoz@itcr.ac.cr <https://orcid.org/0000-0001-6823-7379>

6 Escuela de Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mcamacho@itcr.ac.cr <https://orcid.org/0000-0002-1625-9039>

7 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggarro@itcr.ac.cr <https://orcid.org/0000-0001-7578-1938>

8 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: kjimenez@itcr.ac.cr <https://orcid.org/0000-0002-0162-9279>

9 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jmora@itcr.ac.cr <https://orcid.org/0000-0002-2309-1940>

Palabras clave

Musa textilis; agroforestería; fibra natural; árboles tropicales.

Resumen

Musa textilis también conocido como abacá, es un producto no maderable proveniente del bosque, que produce una fibra natural que se extrae del pseudotallo de la planta. Es un cultivo de exportación y su producción está en manos de pequeños productores. El manejo de este cultivo a nivel de finca es compatible con las políticas y estrategias de biodiversidad, descarbonización y bioeconomía impulsadas por las autoridades de gobierno del país. Particularmente en este trabajo se presentan alternativas de diversificación del cultivo para apoyar la reducción de la deforestación, el manejo y conservación de los bosques, la reforestación y el fomento a los sistemas agroforestales (SAF). Asimismo, incide en la conservación de la biodiversidad, el agua, en los valores de belleza escénica en el paisaje rural y en la dinamización de la economía. La problemática que se atiende es la falta de conocimiento científico y tecnológico sobre los aspectos relacionados con el cultivo de abacá, que incluyen a los sistemas agroforestales con especies maderables de alto valor comercial, así como la caracterización de la fibra que permita proponer nuevos usos y darle mayor valor agregado al producto de exportación; así como abrir nuevos emprendimientos a nivel nacional.

Abstract

Musa textilis also known as abacá, is a non-timber forest product that produces a natural fiber extracted from the pseudostem of the plant. It's an export crop and its production is in the hands of small producers. The management of this crop at the farm level is compatible with the biodiversity, decarbonization and bioeconomy policies and strategies promoted by the country's government authorities. In particular, this work presents crop diversification alternatives to support the reduction of deforestation, forest management and conservation, reforestation and the promotion of agroforestry systems (SAF). It also has an impact on the conservation of biodiversity, water, scenic beauty values in the rural landscape and stimulates the economy. The problem being addressed is the lack of scientific and technological knowledge on the aspects related to the abaca cultivation, including agroforestry systems with commercially valuable timber species, as well as the characterization of the fiber to propose new uses and add greater value to the export product and open up new ventures at the national level.

Keywords

Musa textilis; agroforestry; natural fiber; tropical trees.

Introducción

Musa textilis es una especie monocotiledónea perteneciente a la familia Musaceae y endémica de Filipinas [1]. Es un cultivo de tipo herbáceo con una estructura análoga a las plantas de banano; aunque a diferencia de éstas, su utilidad comercial no está dirigida hacia el ámbito alimenticio, a pesar que produce pequeños frutos y semillas (entre 20 y 200 por dedo) y cuya viabilidad en Costa Rica es limitada [2]. Su producto comercial es el pseudotallo, del cual se extrae fibra vegetal de calidad comercial. A pesar de la importante cantidad de semillas producidas por planta, el material vegetativo a utilizar para el establecimiento de plantaciones consiste principalmente de yemas, cormos (completos o fracciones que posean una yema vegetativa), y es una realidad incursionar con material proveniente de propagación *in vitro* [3].

Se tienen reportes que datan desde el siglo XX, en donde se ha extraído la fibra vegetal de esta especie para su uso cotidiano [1] en diferentes ámbitos comerciales como la fabricación de cuerdas, textiles, muebles, entre otros [4]. Aunque su uso decayó con la intensificación de la fabricación de polímeros sintéticos en la época de la Segunda Guerra Mundial [5]; en los últimos años, y con la implementación de políticas mundiales dirigidas a la mitigación del daño ambiental provocado con el uso de polímeros sintéticos, las fibras naturales han vuelto a cobrar impacto, por lo cual existen nuevas posibilidades de desarrollo comercial [6].

Es por esto, que más recientemente se ha incursionado en el uso de la fibra en aleaciones con otros materiales para su uso en la industria automotriz, aeroespacial y en aplicaciones industriales [7]. Estas aplicaciones, incluyen aleaciones de propileno termoplástico como sustituto de la fibra de vidrio, ya que debido a su gran resistencia mecánica y longitud presentan potencial para estas capacidades [8], [9]. A su vez, Gumowska *et al* [10] han incursionado en la creación de nanocelulosa para su uso como capa barrera para tableros de partículas para reducir la emisión de compuestos orgánicos volátiles presentes en los productos a base de madera.

Asimismo, esta fibra es considerada como un potencial sustituto a la madera para la fabricación de pulpas de papel debido a que se caracteriza por presentar excelentes propiedades mecánicas (tensión-flexión) y químicas (14% lignina) [11]. Actualmente gran parte del material procesado se enfoca en la fabricación de papel de alta calidad y uso especializado como bolsas de té y filtros de diferentes tipos [12].

En Costa Rica, el cultivo se introdujo en 1941 en la región de Matina llegando a tener una extensión más de 4200 ha, aunque esta expansión decayó con el desarrollo de materiales sintéticos al igual que en el resto del mundo. Actualmente, el país está posicionado como el tercer productor mundial después de Ecuador, y cuenta con aproximadamente 1500 ha, cuyo producto es exportado a la Unión Europea, Japón e India [13]. Debido a factores como la buena distribución de lluvias a lo largo del año y la posibilidad de acceso a tecnología agrícola, Costa Rica presenta un alto potencial para alcanzar rendimientos superiores y de calidad a los logrados por los países competidores [3].

En Filipinas, se ha reportado que este cultivo presenta la posibilidad de ser integrado en sistemas de manejo diversificado como lo son los sistemas agroforestales, ya que incrementa la posibilidad de favorecer las repercusiones socioeconómicas [14], [15], [16]; y previene la erosión del suelo debido a su sistema de raíces adventicio [15] y grandes hojas que reducen el impacto directo de la lluvia sobre la capa superficial [17]. A su vez, Bande *et al.* [18] destaca que ante la aplicación de sombreado se obtienen rendimientos superiores a los obtenidos en sistemas de monocultivo.

Es de considerar, que la interceptación de la radiación y la eficiencia con la que la energía de la radiación es aplicada para producir fotosintatos en estos sistemas, es un factor determinante en el crecimiento del componente arbóreo [19]. A pesar de que se tienen reportes de que el sombreado reduce en gran parte la capacidad fotosintética y la transpiración [20], también es importante destacar que las adaptaciones morfológicas y fisiológicas propias de cada especie tienden a manifestarse en respuesta a las variaciones de radiación solar con el propósito de maximizar la eficiencia fotosintética [21]. Otros autores han destacado que con este control se puede incrementar en hasta un 53% los valores de eficiencia neta de fotosíntesis captados por los cultivos, siendo el elemento clave la distribución de los productos de la fotosíntesis [22].

Por lo anterior, el objetivo del estudio fue generar información técnica y científica del componente forestal en asocio con el cultivo de *M. textilis* que contribuya al incremento de la capacidad productiva y de exportación de la fibra de abacá hacia mercados internacionales con un mayor valor agregado bajo principios de sostenibilidad ambiental.

Metodología

Con el propósito de generar información científica validada, diversos experimentos de campo y de laboratorio se están llevando a cabo. Los ensayos se establecieron en junio de 2020, en diversas fincas pertenecientes a la Asociación de Productores de Abacá y Cultivos Agroforestales (ASPA) ubicada en Las Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10°23'01.6 "N, 83°56 '36.1"W). Los sitios se caracterizan por poseer un clima de bosque muy húmedo tropical (bmh-T) [23]; con una precipitación promedio anual entre 4000 y 4200 mm, y una temperatura media anual entre 27 y 28 °C [24]. Los suelos pueden variar según su clasificación en Ultisoles e Inceptisoles [25]; los primeros con un pH ácido menor a 5,5 y una saturación de acidez del 40%, y los segundos con un pH mayor a 5,7 y una saturación de acidez menor a 5%. En ambos tipos la pendiente es ligera (< 5%).

Los experimentos tienen un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones; y generan en su conjunto o individualmente información de crecimiento (diámetro y altura) de las plantas de abacá, de la interacción del cultivo con árboles de diferentes especies maderables, del control de arvenses y uso de fertilizantes, del contenido de nutrientes en tejidos, la deshija, métodos de propagación en vivero y cultivo *in vitro* en laboratorio, así como técnicas de extracción de fibras y su caracterización como biomaterial. En todos los ensayos se tienen estandarizadas las técnicas, instrumentos y métodos de medición de las variables.

Variables a medir e instrumentos

Debido a que las cepas de abacá crecen continuamente en número de tallos, por lo que siempre se selecciona y marca una muestra para mediciones en el mismo tallo durante todo el periodo de medición. Se llevó el control del número de pseudotallos por cepa y del conteo del número de hojas por tallo. En el caso de los árboles, se midió la altura total y el diámetro basal hasta que superaran el diámetro comercial a la altura de 1,30 m sobre el nivel suelo.

La información fisiológica del cultivo incluyó el registro del patrón arquitectural de las plantas y el índice de cobertura de copa con el uso de la aplicación CANOPEO [26]. Las mediciones de respuesta fotosintética para cada especie, están previstas durante el ciclo de crecimiento de los cultivos, utilizando el medidor CIRAS III variando en la cubeta con los diferentes niveles de luz PAR y las concentraciones de CO₂ para obtener las curvas de fotosíntesis a partir de una muestra representativa de plantas por tratamiento y repetición. Los resultados de estas mediciones se tratarán en un artículo diferente. Asimismo, se midió la radiación fotosintéticamente activa (PAR) a partir de los tres meses de establecidos los cultivos con un sensor quantum instalado en un Ceptometro Accupar LP 80.

Se midió la biomasa en abacá, mediante el muestreo de pseudotallos por tratamiento y repetición de manera mensual. Las muestras (1 kg) fueron secadas por separado a 65 °C hasta alcanzar el peso seco constante y molidas para determinar los contenidos nutricionales mediante métodos estándar. Una muestra de peso húmedo conocido fue secada a 105 °C, para determinar la biomasa seca ($\pm 0,1$ g). El área foliar por tallo se determinó con el método de Kumar *et al.* [27] complementado con los metadatos de largo, ancho y número de hojas para desarrollar ecuaciones alométricas.

Los análisis químicos vegetales se realizaron en el Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua del INTA; y el número de muestras totales fueron optimizadas en función del presupuesto disponible. La materia orgánica y carbono total (CT) se determinó por el método de Walkey y Black por oxidación con dicromato de potasio; el nitrógeno total (NT) por destilación por el método Kjeldahl y el fósforo por extracción por el método ISFEIP (International Soil Fertility Evaluation and Improve). Se determinó también los contenidos de bases (potasio, calcio, magnesio) y otros nutrientes por el método de digestión con ácido nítrico-perclórico por absorción atómica.

Análisis estadístico

La información colectada fue analizada con ayuda del software InfoStat versión 2020, así como con el uso de rutinas de análisis en R v. 3.6.2. Previo a cualquier análisis, se realizaron las pruebas de consistencia de datos. Las rutinas de análisis consideraron el análisis de correlación, regresión múltiple y no lineal, de varianza, pruebas de comparación múltiple y análisis multivariado. Todas las pruebas tuvieron el respaldo del análisis de supuestos para el uso de técnicas paramétricas. Además, se previó el análisis con estadística no paramétrica en los casos que se amerite.

Resultados y discusión

Experiencias en el manejo del cultivo

El abacá requiere de todos los cuidados básicos de un cultivo comercial, lo cual reafirman los productores de la zona. Sitios con algún grado de compactación debido a actividades previas (ganadería o cultivos anteriores) requieren una descompactación, preferiblemente con subsoleo de bajo impacto. Sitios con acidez mayor al 10-15% requieren desde el inicio, un control adecuado de la acidez mediante encalados con carbonato de calcio, cal dolomita o surco mejorador. Experiencias más recientes recomiendan el análisis microbiológico a los suelos antes de la siembra y el uso de controladores biológicos y nematicidas. Las recomendaciones técnicas y dosis se realizan posterior a los análisis químicos de los suelos. También es muy importante respetar las condiciones de humedad del suelo, ya que sitios con un nivel freático alto no favorecen el desarrollo del cultivo y pueden ocasionar pérdidas importantes, previo al establecimiento del cultivo se requiere la asesoría profesional para valorar si una red de drenaje es factible técnicamente y los costos y la inversión lo permiten.



Figura 1. Cultivo de *M. textilis* bajo buenas prácticas de preparación del suelo y aplicación de enmiendas para corrección de la acidez del suelo.

Las experiencias en los ensayos indican que el control de arvenses es de suma importancia, por lo cual el uso mínimo de herbicidas es preferible y en medida de lo posible se debe utilizar el control mecánico. Una práctica bien realizada y con los aditamentos correspondientes resulta en un mayor rendimiento y protección al trabajador, y un menor daño a los cultivos. Este control depende del tipo de planta y de la época, del estado fenológico y de la altura. Alturas de malezas superiores a 50 cm, son un riesgo para los trabajadores por mordeduras de serpientes y causan retrasos en crecimiento al cultivo. En la figura 2 se muestra un sitio con buenas prácticas de control de arvenses.



Figura 2. Cultivo de *M. textilis* bajo buenas prácticas de control de arvenses. a. Plantación de 4 ha con régimen adecuado de control; b. Cepa rodajeada con presencia de arvenses que protegen el suelo de la erosión sin efectos negativos al cultivo.

Comportamiento del crecimiento del cultivo bajo sombra

Debido a las disposiciones actuales del país en la prevención de la entrada de la enfermedad denominada Marchitez por *Fusarium oxysporum f.sp. cubense (Foc)* Raza 4 Tropical-Foc R4, se prohíbe el trasiego de semilla sin certificar. Este aspecto actualmente limita el desarrollo de nuevas plantaciones y es responsabilidad de los productores y las empresas de llevar un buen control del uso de semilla con permiso para el trasiego. Independientemente, de si es semilla certificada tipo corno, yema en bolsa o vitroplanta; el cultivo de abacá requiere de una etapa previa de establecimiento. Por ello, es importante la preparación inicial del sitio con cuidados de corrección de los suelos, control de arvenses y verificación de microorganismos del suelo.

Pueden pasar hasta tres meses para que la planta madre desarrolle nuevos rebrotes y comience a incrementar el número de hojas, momento en el cual deberá prestarse atención a las indicaciones de deficiencias foliares; que pueden corregirse con la aplicación de fertilizante a la raíz y foliar. Formulaciones iniciales de nitrógeno (urea azufrada) han dado respuestas positivas, así como posteriormente fórmulas bajas en fósforo y altas en potasio. Asimismo, aplicaciones foliares de gallinaza líquida (Magic Green) y uso de bioestimulantes tales como Protifert K, Stimplex y Naturam 5 están dando resultados satisfactorios según el criterio técnico y las experiencias de campo. Debe tomarse en cuenta que el costo de los fertilizantes comerciales tiene una tendencia al incremento por las repercusiones de la pandemia y más recientemente el conflicto Rusia-Ucrania.

En la figura 3, se muestran los valores de crecimiento en altura hasta el punto de inserción de la hoja bandera en los primeros siete meses en un ensayo de sombreado con sarán establecido a cuatro intensidades de sombra. Según esto, en los primeros tres meses se da la fase de establecimiento de la planta en el nuevo ambiente, donde crece poco, hay pocos rebrotes y se consolidan las primeras hojas. A partir del tercer mes, inicia un período vegetativo que puede ser estimulado con buenas prácticas de manejo y fertilización. Asimismo, el manejo adecuado de la deshierba (con buena desinfección de herramientas) incide en plantas de libre crecimiento, de manera que tallos con buen grosor pueden alcanzar hasta 30 kg de peso verde y un rendimiento de hasta 3 kg de fibra seca al aire.

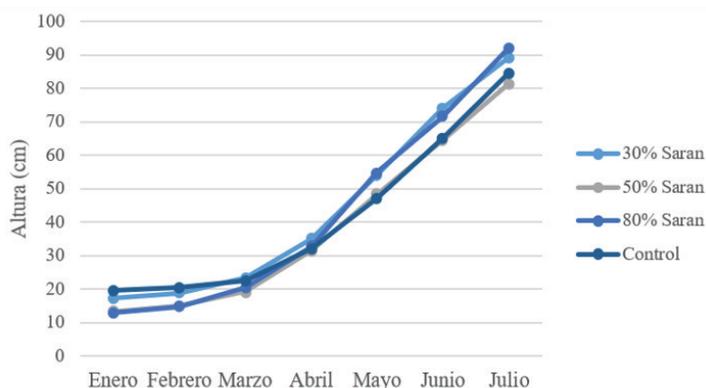


Figura 3. Curva de desarrollo de la altura de *M. textilis* en los primeros meses de establecimiento.

Existe evidencia de que se puede mejorar la productividad y calidad de la fibra bajo condiciones de sombra. Un experimento formal, bajo un diseño de bloques completos al azar, se está llevando a cabo, utilizando tres tipos de sarán negro con porcentajes de entrada de luz de 30, 50 y 80% con un tratamiento testigo al 0% de sombra (figura 4). En la figura 5, se muestran los resultados del conteo mensual del número de hojas por planta, donde sobresale el tratamiento al 80% (diferencias significativas), que provoca un mayor número de hojas en comparación con el testigo y un mejor desarrollo en altura.

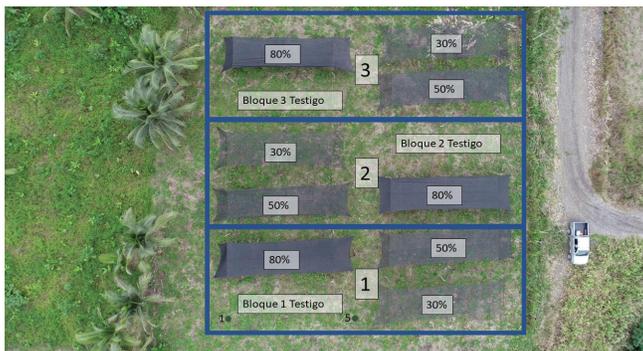


Figura 4. Ensayo de *M. textilis* a diferentes niveles de sombra artificial (0, 30, 50 y 80%).

Es de comprensión que el experimento debe continuar sus mediciones hasta la primera cosecha, momento el cual se analizará el rendimiento de la fibra y su calidad.

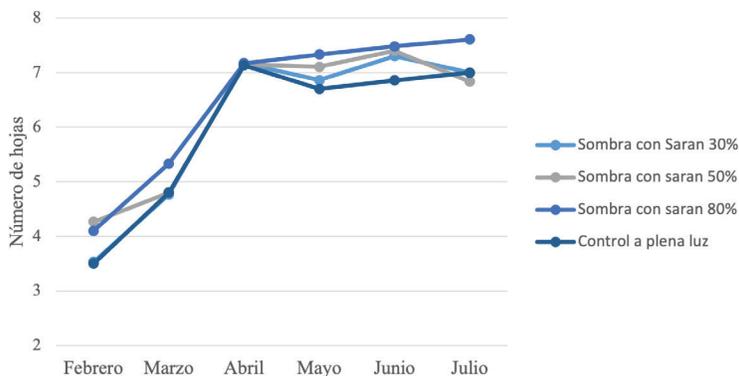


Figura 5. Número de hojas en plantas de *M. textilis* establecidas a diferentes niveles de sombra.

Comportamiento del abacá bajo el dosel de árboles

En la figura 6, se muestra un experimento de mediciones de plantas de abacá en etapa productiva donde fueron seleccionadas dos muestras de plantas: un grupo creciendo a pleno sol y otro grupo creciendo bajo la sombra de árboles de *Vochysia guatemalensis*. El ensayo busca mostrar el efecto del sombreado en el desarrollo, rendimiento y calidad de la fibra. Los resultados finales serán de importancia para demostrar la posibilidad de intercalar los cultivos forestales en áreas con cobertura forestal.



Figura 6. Ensayo de *M. textilis* bajo la sombra de árboles de *V. guatemalensis* en avanzado estado de madurez.

En la figura 7, se muestran los resultados preliminares de las mediciones del diámetro y la altura hasta el punto de inserción de la hoja bandera de plantas de abacá creciendo bajo la sombra de árboles y a pleno sol. Para ambas variables, se registraron mejores condiciones en las plantas que crecen bajo dosel, lo que hasta el momento evidencia que la sombra causa un efecto positivo en las plantas de abacá. Como se mencionó anteriormente, hace falta llevar el experimento hasta cosecha para comprobar el efecto en el rendimiento, especialmente en las características de la fibra.

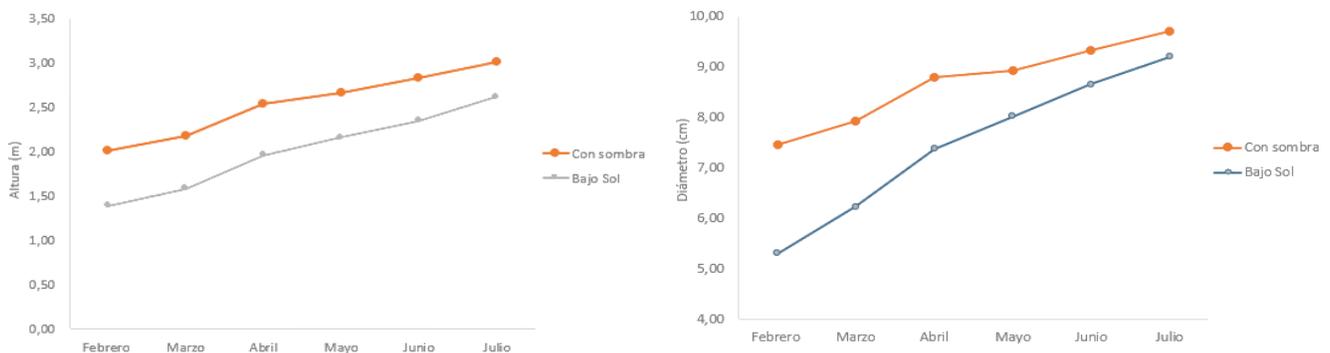


Figura 7. Evolución del diámetro y de la altura hasta el punto de inserción de la hoja bandera en *M. textilis* creciendo bajo la sombra de árboles de *V. guatemalensis* y a pleno sol.

Conclusiones

M. textilis es un cultivo promisorio de interés para la exportación en Costa Rica, y requiere de prácticas de manejo que garanticen a los productores un rendimiento adecuado y a las empresas una calidad de fibra aceptable. El uso de sombreo para fomentar el rendimiento y la productividad de los cultivos, se ha valorado como un parámetro potencial para su implementación futura a nivel nacional como fomento para el incremento de área cultivada, la diversificación del sistema productivo, los ingresos adicionales por venta de madera y por consiguiente de las exportaciones. En relación a esto, la diversificación del cultivo mediante la modalidad de sistemas agroforestales es una opción que verídicamente aumenta la rentabilidad de los proyectos por el valor adicional del componente forestal. Las especies maderables estudiadas en asocio agroforestal presentan una interacción positiva en el crecimiento inicial, aunque los resultados definitivos se deben contrastar con el rendimiento y calidad de la fibra en un futuro cercano. Es de considerar, que se debe continuar con las mediciones para completar el ciclo de producción y realizar los análisis estadísticos definitivos.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración financiera de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Tecnológico de Costa Rica a través del proyecto “Impulso tecnológico a los sistemas agroforestales para la producción sostenible de fibras naturales para exportación: cultivo de abacá (*Musa textilis* Née) como alternativa versátil para productores rurales en Costa Rica” (2020-2022). El proyecto atiende a la generación de información sobre aspectos de manejo, nutrición, fisiología, caracterización y usos alternativos de la fibra, protocolo de cultivo *in vitro* y capacitación a productores. Se agradece a la Dirección de Posgrado TEC por la beca otorgada a la primera autora.

Referencias

- [1] S. Richter, K. Stromann y J. Müssig, «Abacá (*Musa textilis*) grades and their properties—A study of reproducible fibre characterization and a critical evaluation of existing grading systems,» *Industrial Crops and Products*, vol. 42, pp. 601-612, 2013.
- [2] L. C. Galvez, R. L. B. Koh, C. F. C. Barbosa, y D. y Zhang, «Sequencing and de Novo Assembly of Abaca (*Musa textilis* Née) var. Abuab Genome,» *Genes*, vol. 8, n° 1202, p. 12, 2021.
- [3] M. E. Aguilar, J. L. Ortiz y J. Washing, *Abacá: Particularidades de su cultivo y avances en técnicas de micro propagación en Costa Rica*, Costa Rica: Bioersivity International, 2011.
- [4] H. T. Edwards y M. M. Saleeby, «Abacá (Manila Hemp),» Department of the Interior Bureau of Agriculture, Manila, Filipinas, 1910.
- [5] L. Villafuerte-Abonal, ABACA – PHILIPPINES., Manila, Filipinas: Luis R. Villafuerte and Apples of Gold Publishing., 2006.
- [6] N. Ramli, N. Mazlan, Y. Ando, y N. Sairy, «Natural fiber for green technology in automotive industry: A brief review.,» *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 368, n° 012012, 2018.
- [7] R. B. Armezin y W. C. Coseco, «Abaca (*Musa textilis* Nee) allometry for above-ground biomass and fiber production,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 46, pp. 181-189, 2012.
- [8] A. Netravali y S. Chabba, «Composites get greener,» *Materials Today*, vol. 6, n° 4, pp. 22-29, 2003.
- [9] S. Evans, «The “Age of Agricultural Ignorance”: Trends and Concerns for Agriculture Knee-Deep into the Twenty-First Century,» *Agricultural History*, vol. 93, n° 1, pp. 4-34, 2019.
- [10] A. Gumowska , G. Kowaluk, J. Labidi y E. Robles, «Barrier properties of cellulose nanofiber film as an external layer of particleboard,» *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 21, n° 10, pp. 2073-2079, 2019.
- [11] D. Bazliah, S. Wulansari, A. Darmawan, E. M. Idzati, H. Ni'mah, A. Roesyadi y F. Kurniawansyah, «Prediction of Kappa number and carbohydrate degradation in oxygen delignification of Abaca fiber,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1053, n° 1, 2021.

- [12] K. Vijayalakshmi, C. Neeraja, A. Kavitha y J. Hayavadana, «Abaca Fibre,» *Transactions on Engineering and Sciences*, vol. 2, n° 1, pp. 6-9, 2014.
- [13] PROCOMER, «Abacá: *Musa textilis*,» PROCOMER, San José, Costa Rica, 2019.
- [14] B. B. Dargantes, «Socio-ecological case studies on forest lands cultivation in Leyte, Philippines,» *PLITS*, vol. 14, n° 2, 1996.
- [15] C. Lacuna-Richman, «The role of abaca (*Musa textilis*) in the household economy of a forest village.,» *Small-scale forest economics, management and policy*, vol. 1, n° 1, pp. 93-101, 2002.
- [16] M. Rodríguez, I. Davidson-Hunt y F. Berkes, «Social-ecological memory and responses to biodiversity change in a Bribri Community of Costa Rica,» *A Journal of the Human Environment*, vol. 1, pp. 1-12, 2019.
- [17] T. Pattison, L. Smith, P. Moody, y L. Gulino, «Banana root and soil health (BRASH) project,» de *Banana root system: towards a better understanding for its productive management.*, San José, Costa Rica, Turner, D.W., Rosales, F.E. (Eds.), 2003, pp. 149-165.
- [18] M. M. Bande, J. Grenz, V. B. Asio y J. Sauerborn, «Morphological and physiological response of Abaca (*Musa textilis* var. Laylay) to shade, irrigation and fertilizer application at different stages of plant growth,» *Journal of AgriScience*, vol. 3, n° 2, pp. 157-175, 2013.
- [19] A. R. Kemanian, C. O. Stöckle y D. R. Huggins, «Variability of barley radiation-use efficiency,» *Crops Science*, vol. 44, pp. 1662-1672, 2004.
- [20] N. Akhter, M. Rahman, M. Hasanuzzaman y K. Nahar, «Physiological response of garden pea (*Pisum sativum* L.) grown under different light environment,» *Botany Research International*, vol. 2, n° 4, pp. 304-309, 2009.
- [21] S. Duriyaprapan y E. J. Britten, «The effects of solar radiation on plant growth, oil yield and oil quality of Japanese mint,» *Jour. of Exp. Botany*, vol. 33, n° 137, pp. 1319-1324, 1982.
- [22] D. Zhang, G. Du, Z. Sun, y L. Zhang, «Agroforestry enables high efficiency of light capture, photosynthesis and dry matter production in a semi-arid climate,» *European Journal of Agronomy*, vol. 94, pp. 1-11, 2018.
- [23] L. Holdridge, *Ecología basada en zonas de vida*, San José, Costa Rica: Instituto Interamericano, 1978.
- [24] Climate-data, «Clima: Las Horquetas (Costa Rica).,» Climate-data, 2016. [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/americas-del-norte/costa-rica/heredia/las-horquetas-874786/>.
- [25] E. Ortiz y C. Soto, *Atlas Digital de Costa Rica 2014*, Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica., 2014.
- [26] A. Patrignani y T. E. Ochsner, «Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover,» *Agronomy Journal*, vol. 107, n° 6, pp. 2312-2320, 2015.
- [27] N. Kumar, V. Krishnamoorthy, L. Nalina y K. Soorianathasundharam, «Nuevo factor para estimar el área foliar total en banano,» *INFOMUSA*, vol. 11, n° 2, pp. 42-43, 2002.



Vivienda nómada: solución de vivienda móvil en Costa Rica para ambientes urbanos y rurales sostenibles

The nomadic housing, a mobile solution in Costa Rica for environments sustainable urban and rural

Isaac Jose Solis-Mejia¹, Carlos Ugalde-Hernández²,
Dagoberto Arias-Aguilar³

Solis-Mejia, I.J; Ugalde-Hernández, C; Arias-Aguilar, D.
Vivienda nómada: solución de vivienda móvil en Costa Rica para ambientes urbanos y rurales sostenibles. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 60-69.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6236>

- 1 Arquitecto, estudiante Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad. Costa Rica. Autor para correspondencia.
Correo electrónico: arquitecto.isaacsolis@gmail.com
- 2 Arquitecto. Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: cugalde@tec.ac.cr
- 3 Laboratorio de Ecofisiología Forestal y Aplicaciones Ecosistémicas (Ecoplant), Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: darias@itcr.ac.cr

Palabras clave

Vivienda; comunidad agroecológica; objetivos de desarrollo sostenible; sostenibilidad; diseño.

Resumen

Este trabajo cita, sintetiza, puntualiza y describe información, elementos e interacciones que generan diferencias cuantitativas y cualitativas en cuanto al comportamiento del individuo y su vivienda enmarcado en el contexto de la evolución histórica de la especie humana y los distintos conceptos arquitectónicos bajo criterios de sostenibilidad. Es por medio del entendimiento del proceso histórico de la especie humana en el desarrollo, esfuerzo y mejoramiento de lo que significa la vivienda tradicional sedentaria lo que contribuye e inspira la gestión de nuevos procesos de investigación para definir y proponer un nuevo modelo de vivienda móvil contemporáneo, basado en el origen nómada de nuestra especie. Es por medio de la experiencia profesional, investigación y citación de documentación formal existente, que se propone una solución de vivienda móvil nómada que permita alivianar los ambientes urbanos y rurales contemporáneos, para acoplarnos a la norma del ordenamiento territorial existente de Costa Rica siendo diferentes al modelo tradicional sedentario.

Keywords

Housing; agroecological community; sustainable development goals; sustainability; design.

Abstract

This work references, synthesizes, specifies, and describes information, elements and interactions that generate quantitative and qualitative differences regarding the behavior of the individual and their home, framed in the context of the historical evolution of the human species and the different architectural concepts under sustainability criteria. It is through the understanding of the historical process of the human species in the development, effort and improvement of what traditional sedentary housing means that contributes and inspires the management of new research processes to define and propose a new model of contemporary mobile housing, based on the nomadic origin of our species. It is through professional experience, research, and citation of existing formal documentation, that a nomadic mobile housing solution is proposed that allows to alleviate contemporary urban and rural environments, to comply with the existing land use regulations of Costa Rica being different from the traditional sedentary model.

Introducción

El Origen de la vivienda

La vivienda en su concepto más claro y simple es representada por nuestra especie como el espacio, en donde de manera sedentaria, hemos desarrollado nuestra civilización contemporánea, haciendo uso de la lógica y el propósito básico desde nuestro origen el cual es obtener el área necesaria para crear el refugio seguro que permite nuestra sobrevivencia, cumpliendo la función destinada para ser habitada. La composición de esta área a la que reconocemos como vivienda, varía su forma y diseño partiendo de la capacidad económica del individuo que la requiere. Es parte de las características principales de una vivienda, condescender la sobrevivencia del humano que la habita, permitiéndole guardar los enseres necesarios junto con sus propiedades materiales, así es como ha sucedido desde la cueva hasta la contemporaneidad [1] [2].

Archivado en documentos generados por estudios que se esfuerzan en trazar el origen y la cronología de nuestra especie; la historia detalla, lugares primitivos que cumplieron el objetivo de vivienda enmarcado en un estilo de vida sedentario, por ejemplo, en Holanda se demostró el hallazgo de varias piezas de cerámica neolítica, en donde aquellos humanos almacenaban el excedente de producción de alimentos, siendo esto prueba que nuestra especie aprendió a dominar lo que le rodeaba, sembrando, domesticando animales, viviendo en comunidad para asegurar así su existencia [3]. En la ladera sur de las montañas Tatra y Beskidy en Eslovaquia, sucedieron dos excavaciones que dieron información de asentamientos primitivos datados en la Edad de Piedra Media, dejando evidencia de la construcción de un tipo de vivienda y herramientas para cazar [4]. A esta necesidad de refugio ya conquistada por nuestra especie, en Europa, sucede un nuevo periodo denominado culturas megalíticas las cuales su propósito todavía es tema de debate, ya que el significado de dichas estructuras evidentemente va más allá de cumplir la necesidad básica de refugio, Stonehenge, Inglaterra [5]. Por otro lado, en la actual Turquía, tenemos el descubrimiento sucedido en los años cincuenta en lo que hoy se reconoce como una de las primeras ciudades antiguas, Catal Huyuk [6]. La evidencia señala que nuestra especie humana se encuentra en un punto más complejo de su desarrollo. Es esta ciudad el referente del arte y la arquitectura, que señalan un antes y un después por su tamaño y cantidad de pobladores que ha decidido vivir de manera sedentaria, forjando así los cimientos de lo que vendría por delante en cuanto al desarrollo de las futuras metrópolis admirables que albergaran miles y millones de humanos en viviendas con alto valor, en el mundo antiguo tales como: Tebas en Egipto, Cartago en Túnez, Teotihuacán en México, Bagdad en Irak, Constantinopla en Turquía, Atenas en Grecia, Roma en Italia [7] [8].

Las ciudades antiguas y sus diferentes sociedades establecieron en la necesidad de sobrevivir la solución de construir una vivienda como refugio seguro, esto les permitió dejar de ser nómadas y de la mano con esto se desarrolló el conocimiento técnico y científico, que generó más cosas útiles, descubriendo y desarrollando, la ingeniería, la matemática, la física, la escritura, la astrología, la astronomía, la química, agricultura, etc. Prueba de este avance se referencia en las civilizaciones: sumeria y babilónica [9].

Este viaje histórico, extiende el entendimiento del origen que marca nuestro estilo de vida dentro de los límites de una ciudad, es el sentido de refugio que requirió nuestra especie en su origen lo que nos llevó a vivir, bajo leyes y estatutos, marcados por elites de las distintas clases sociales en su esfuerzo para evitar conflictos, y así tener una vivienda enmarcada dentro de un orden lógico; por ejemplo hoy en Costa Rica está en vigencia el decreto N.º 38145 Plan GAM 2013-2030 [10] este plan tiene que ver con el ordenamiento territorial el cual está orientado en la Gran Área Metropolitana, zona donde se acumula la mayoría de personas de este país. Claro ejemplo y esfuerzo por mantener orden en cuanto al desarrollo de mejores viviendas y las distintas otras estructuras que le componen.

La capacidad económica que tiene una persona determina el espacio donde se puede construir una vivienda: lote. La ubicación de este lugar marca las primeras anotaciones en cuanto a las determinantes naturales a resolver para poder ejecutar la construcción de una típica vivienda sedentaria. Son estas viviendas las cuales hoy en día se aprecian desde un núcleo variado denominado como: tugurio, residencial, condominio y villas exclusivas, las que claramente conforman un todo. Es la conexión entre la vivienda, los espacios públicos y edificios de la empresa privada y pública, las que dan forma a lo que conocemos como ciudad [11].

Así como sucedió en la antigüedad, hoy tenemos variados núcleos de vivienda, y son estos los que determinan el nivel de riqueza y pobreza de una ciudad, una simple relación de esto se distingue fácilmente: entre más tugurios más pobre la ciudad, entre más villas exclusivas más prospera es la ciudad. Estas son las características que determinan la belleza de una urbe,

pero al analizar más profundo a los individuos que la conforman en cuanto a su capacidad económica contra el nivel de educación, se puede medir mejor el impacto que estos producen al medio ambiente de manera directa [12].

La generación de problemas provocada por el estilo sedentario y diseño de nuestras viviendas no distingue nivel social, en cuanto a la falta de planificación y el crecimiento desmedido por la abundancia o carencia de los recursos adquiridos por los distintos núcleos. Este es un factor que inquieta directamente este estilo de vida, el cual tiene que ver con la proyección y correcta utilización de los recursos naturales disponibles, para determinar mejores ubicaciones de dichos núcleos habitacionales en un área determinada. Es el consumo de agua, energía y necesidad de procesar el desperdicio lo que permitirá una mejor sobrevivencia de los que habitan dichas viviendas. - Son variadas las soluciones que permiten mejorar estos aspectos básicos una mejor sobrevivencia, tales como las que tienen que ver con el tratamiento de residuos, mejor distribución del espacio para evitar el estresante hacinamiento, automatización de servicios públicos. También se desarrollan y destacan soluciones con mejor impacto social como son los huertos municipales, propuestas de avenidas con árboles frutales nativos, azoteas verdes, entre otras. Toda esta lógica para cubrir la sobrevivencia básica es la que abre nuevas posibilidades para un desarrollo más sostenible de la comunidad. Existe un nuevo interés y conciencia de nuestra especie humana, por mejorar la utilización de los recursos naturales del planeta, y así conquistar una mejor distribución de estas riquezas, y reducir la pobreza [13].

El desarrollo humano y sus distintas maneras de sobrevivencia ha llevado a personas por la senda de la creatividad para definir maneras más simples de vida, entre ellas destaca el término: Tiny House, [14] es esta una forma de vida que ha encontrado popularidad en los últimos años en países donde el nivel de vida es más costoso [15]. La búsqueda de una sobrevivencia plena y digna permite que estas soluciones sean populares cada vez más. El planteamiento de este nuevo modelo de desarrollo humano de la vivienda nómada va ligado a la necesidad de la creación de distintas comunidades agroecológicas que permitan ser los puertos de anclaje de las personas que se movilizan según sus libertades. El planteamiento de la vivienda nómada cumple con distintas metas de los 17 objetivos del desarrollo sostenible planteados en el 2015 en la agenda del desarrollo planetario. La vivienda nómada encaja y es parte del engranaje como pieza fundamental del objetivo 11 de la agenda 2030 en cuanto a conquistar una solución que permita una ciudad y comunidades sostenibles. Es este planteamiento integrador de la vivienda nómada el que destaca por ser un modelo de desarrollo autosostenible de lo que significa un Smart City [16] lo cual lo une a los objetivos número seis, siete, nueve, diez, doce, trece, quince y dieciséis; siendo la interacción con distintas comunidades agroecológicas, el factor que produce, contempla y apoya la implementación tecnología que genera los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos pacíficos entre zonas urbanas y rurales, generando intercambio cultural dinamizando nuevas oportunidades económicas caracterizadas por ser un comercio sostenible, llegando así también a integrar los objetivos número diecisiete, uno, dos, tres, cuatro y cinco ya que la creación de nuevas cadenas de valor surgen de manera natural con este modelo nómada que motiva acciones sin presiones sociológicas estresantes externas, destacando el más importante objetivo de un individuo: sobrevivir [17].

¿Qué es un remolque? Es una herramienta antigua como la humanidad misma y su característica principal se basa en ser un vehículo sin motor, el cual es arrastrado por otro vehículo o individuo ya que su uso es meramente para el transporte de mercancías [18]. La variedad de este tipo de armazones en cuanto a forma es de comprensión simple, en su mayoría son simples cajas compuestas de materiales livianos, aptas para transportar cualquier carga. En esencia es la manera más simple de transportar algo de un punto (A) al punto (B). La cantidad de tecnología

que se implementa en un remolque básicamente depende de quién lo construye, como también para lo que va a ser utilizado ya que, dependiendo de su peso, puede necesitar un sistema de frenado propio, siendo este un claro ejemplo de seguridad [19].

La capacidad del remolque se define previamente a su fabricación precisando un diseño que detalla una ficha técnica de sus características principales. Existe una amplia variedad de remolques, con propósitos específicos para transportar carga industrial, agrícola, espacial, vehicular, alimentaria, química, petrolera, forestal, minera, humana, animal, y otros [20].

El ser humano lleva mucho tiempo utilizando ingeniosos tipos de remolques, la más simple de éstas, es la carreta arrastrada por tracción animal, utilizada para la cosecha y en tiempos bélicos para la guerra. Esto trata de un humano valiéndose de su ingenio simplificando su existencia con la utilización de un elemento que le permita cargar un mayor volumen de cosas [21]. La solución a este problema de poder cargar más consigo mismo, dio origen a un cimiento de la economía actual el transporte de mercancías de manera global: Globalización [22].

La detección de tendencias conllevan arraigo histórico y es esto lo que suele ser la respuesta a una situación compleja que requiere inmediatez para aportar valor al hecho que se desarrolla tales como son los remolques del tipo agrícola, [23] remolques tipo cisterna, [24] soluciones habitacionales económicas, [25] propuestas de vivienda móviles [26] [27]. Es en estos ejemplos a parte de nuestro origen nómada en donde se ha encontrado inspiración para desarrollar este modelo y su investigación.

En cuanto a legislación y regulaciones específicas sobre establecer una vivienda sobre una estructura móvil no existe. Lo que tenemos en Costa Rica es, consideraciones sobre la normativa de pesos y dimensiones para vehículos y transporte de Carga en Costa Rica. (Decreto Ejecutivo 31363-MOPT). El documento explica los aspectos más relevantes de la más reciente legislación reglamentaria en transporte de carga por carretera, vigente desde finales del 2003. Especialmente estas consideraciones se refieren a vehículos pesados, sus pesos y dimensiones máximos, la señalización y requisitos para la circulación. Elementos descriptores para resaltar: Pesos y Dimensiones. Como también las reformas a la Ley de tránsito por vías públicas terrestres del 13 de abril de 1993 [28]. El documento oficial que puntualiza información técnica específica se encuentra en los artículos 6, 9, 12 y 75. Todas estas características están debidamente identificadas por la entidad estatal responsable: el Ministerio de Obras públicas [29].

Conceptualización del prototipo de la vivienda nómada

Se define reinventar e innovar, aplicando estos conceptos en esta propuesta; reinventar la rueda es un asunto complicado de lograr, entonces aplicamos el segundo concepto, que tiene que ver con la innovación ya que se trata de la introducción de nuevas modificaciones a los elementos ya existentes con el fin de mejorarlos, así que pasar de una rueda tosca de madera con marco de acero, con ingenio e innovación se pasó a ruedas de caucho, llegando hoy a prototipos de uso militar que no utilizan aire, "Wheeler Airless Tire" [30].

En cuanto a la vivienda tradicional en su más simple forma sedentaria desde su origen en las distintas cuevas y grutas de África, Asia y Europa, tal como el ejemplo anterior existe la oportunidad de reinvención e innovación. La prosperidad es indispensable y el modelo propuesto trae un equilibrio entre: los que más tienen y los que trabajan para obtener plenitud, siendo la vivienda nómada y su prototipo, la propuesta que se destaca por el hecho que no se trata de la conquista de dinero, sino que se enfoca en la reducción de la obtención de cosas inservibles que creemos indispensables. El propósito lógico de valor se encuentra en la adquisición de cosas invaluable como la salud y la educación, mejorando la calidad de vida de

individuos y familias que son propietarios de una vivienda nómada con la correcta proporción en sus espacios, de la mano con el acceso a trabajo en comunidades funcionales con propósito [31].

La tecnología juega un papel indispensable en el desarrollo de la humanidad, en el caso de la vivienda tenemos un ejemplo claro de esto, con los conceptos planteados por la arquitecta Austriaca, Margarete Schütte-Lihotzky, trabajo y planteamiento de la designada cocina de Frankfurt en 1927 [32]. Fue la tecnología la variable que impulso un nuevo programa arquitectónico de la vivienda moderna; pasamos de calentar nuestros hogares con leña en una chimenea, a utilizar electricidad. Es así como se reinventan los espacios dejando en segundo plano la biomasa cuando se inventó la calefacción; ahora la vivienda tiene la capacidad de calentarse en todos sus espacios y no en un solo punto focal; del mismo modo como ocupábamos un espacio para ahumar las carnes para extender su duración, hoy tenemos aparatos que refrigeran alimentos definiendo un método fácil e higiénico. Es bajo esta referencia que hoy se comprenden los espacios de manera distinta, cocinas más simples, ordenadas y tecnológicas sin consumir mucho espacio en nuestra vivienda.

La vivienda nómada y su prototipo utiliza la base de los criterios anteriores siendo un lugar simple con la tecnología básica que permite la sobrevivencia sobre un remolque, permitiendo desplazamientos terrestres, abriendo oportunidades en cuanto a la generación de riqueza negociando mercancías obtenidas en los distintos caminos por donde este se desplace. Es considerado, un buen negocio todo aquel o aquello, que crea una cadena de valor [33]. La vivienda nómada, es un valor negociable atractivo e innovador en comparación con el modelo sedentario tradicional, al cual hoy en día se le considera un gasto, por su falta de capacidad de ser valorado como un medio de producción.

Metodología

La base histórica descrita anteriormente permitió un análisis de la información y el entendimiento del paso poco sostenible de ser nómada a sedentario, conlleva una fase de investigación documental y técnica para definir la propuesta de la vivienda nómada, detallando el diseño base de un prototipo arquitectónico y una lista de características del concepto que marca la pauta; el cual contempla lógica al representar los procesos sociales de la construcción de ideas de lo que debe ser una parte de la nueva ciudad y su desarrollo humano, reconocidos de manera conjunta al mencionarse como parte fundamental de la propuesta, que une la vivienda móvil con comunidades agroecológicas que participan de los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Para esto se siguieron las etapas de desarrollo del diseño arquitectónico basado en criterios sostenibles y de movilidad.

Resultados de la etapa de diseño

La vivienda nómada es una solución para que se desarrolle en conjunto con varias comunidades agroecológicas, contribuyendo a la disminución del impacto ambiental. El prototipo de vivienda existe sobre un remolque, tal y como se visualiza en la figura 1. Es una solución que provee una de las tantas respuestas al planteamiento que sugiere una Smart City del S. XXI en cuanto a disminuir el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida del ser humano [16].

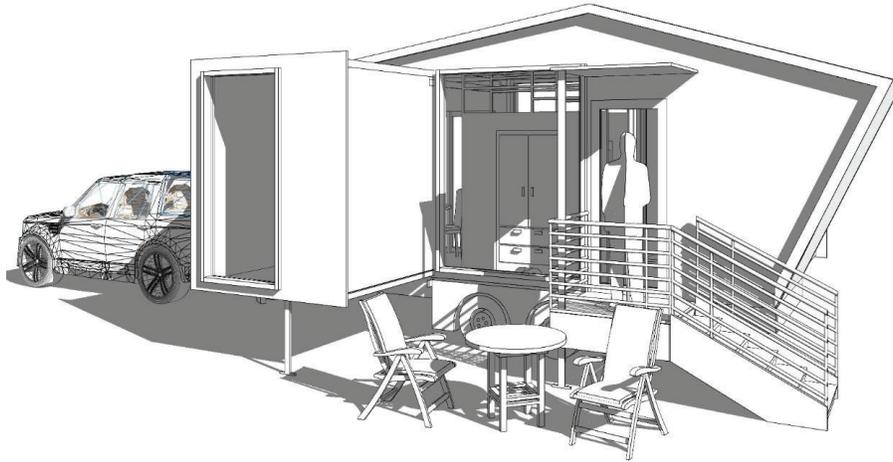


Figura 1. Vista 3D: Remolque vivienda nómada, acceso principal y modulo expandible cocina.

Las figuras 2, 3 y 4, muestran el detalle de los resultados de diseño arquitectónico.

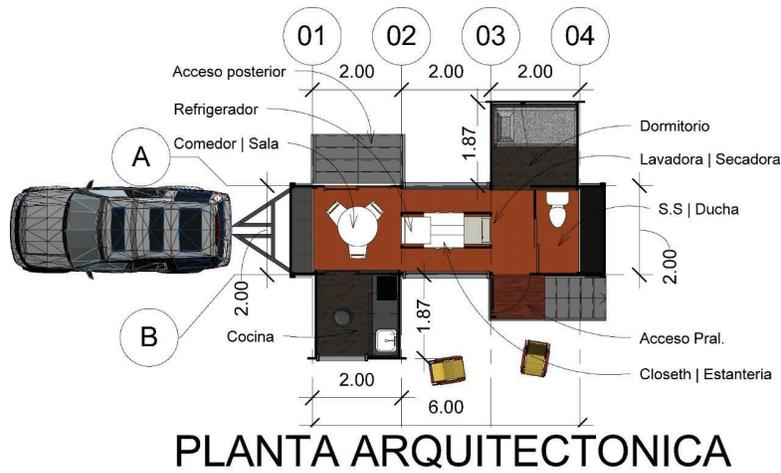


Figura 2. Diseño de plano arquitectónico del concepto de vivienda nómada.



Figura 3. Vistas en corte de la propuesta de vivienda nómada móvil.

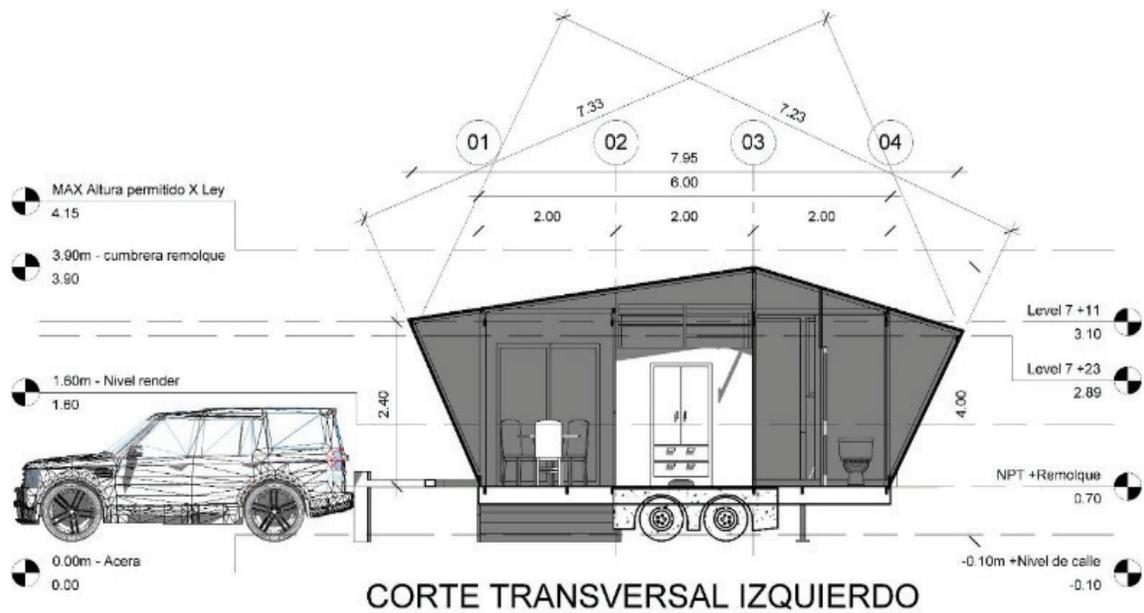


Figura 3. Vista lateral arquitectónico de la propuesta de vivienda nómada móvil.

Características de la propuesta de la vivienda nómada

La vivienda nómada y su prototipo es una solución que contempla ciertas características que no existían en el siglo pasado y otras que se han desarrollado y madurado en la última década del primer cuarto del S.XXI. tales como:

- Chasis de doble eje en acero reforzado
- Rodamiento sin aire.
- Luces tipo LED.
- Sistema mecánico e hidráulico que expande y contrae los espacios diseñados.
- Sistema fotovoltaico.
- Sistema solar térmico.
- Utilización de la madera como material principal que define el cerramiento de la vivienda nómada.
- Sistema de servicio sanitario seco (Sin agua, autónomo)
- Sistema de recolección para descarga posterior de residuos de ducha, lavamanos, lavandería, servicio sanitario y cocina.

Conclusiones y consideraciones

- La vivienda nómada, no pretende redefinir el estilo de vida sedentario. Brinda una opción sostenible ligada a comunidades agroecológicas urbanas o rurales que interactúan entre ellas siendo su característica principal la movilidad, de la mano con los valores y grados de comercialización que aseguran una nueva cadena de valor que establece inversiones a largo plazo atractivas a mercados financieros.

1. La vivienda nómada en comunidad agroecológica es una de las respuestas al planteamiento que sugiere una Smart City del S. XXI siendo participe todo el modelo propuesto de dieciséis Objetivos del Desarrollo Sostenible.
2. La vivienda nómada es el producto maduro de un modelo que amalgama tendencias e iniciativas que conquistan proporción y equilibrio para vivir de manera sostenible, barata, productiva y creativa, maximizando la utilización de los recursos naturales, y tecnología disponible permitiendo ampliar temas culturales por la nueva era de la comunicación, implementando tecnología ancestral y contemporánea.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a Dr. Cristian Moreira Segura por su colaboración y guía en el inicio de esta propuesta y final de esta investigación.

Referencias

- [1] M. Homann, "Earliest life on Earth: Evidence from the Barberton Greenstone Belt, South Africa," *Earth-Science Rev.*, vol. 196, no. June, p. 102888, 2019, doi: 10.1016/j.earscirev.2019.102888.
- [2] M. S. Dodd et al., "Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates," *Nature*, vol. 543, no. 7643, pp. 60–64, 2017, doi: 10.1038/nature21377.
- [3] D. C. M. Raemaekers, L. Kubiak- Martens, and T. F. M. Oudemans, "New food in old pots - Charred organic residues in Early Neolithic ceramic vessels from Swifterbant, the Netherlands (4300-4000 cal BC)," *Archaeol. Korrespondenzblatt*, vol. 43, no. 3, pp. 315–334, 2013, doi: 10.11588/ak.2013.3.39180.
- [4] F. Gyulai, *Archaeobotanical research at the Körös culture site Ibrány-Nagyerdő and its relationship to plant remains from contemporaneous sites in Hungary*. 2010.
- [5] M. P. Pearson et al., "Who was buried at stonehenge?," *Antiquity*, vol. 83, no. 319, pp. 23–39, 2009, doi: 10.1017/S0003598X00098069.
- [6] "Beycesultan Excavations : First Preliminary Report Author (s): Seton Lloyd and James Mellaart Source : Anatolian Studies , Vol . 5 (1955), pp . 39-92 Published by : British Institute at Ankara Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/3642324>," vol. 5, no. 1955, pp. 39–92, 2016.
- [7] E. Cárdenas, *Historia de la arquitectura mundial I*. 2012.
- [8] L. Pasca, "La Concepción De La Vivienda Y Sus Objetos," pp. 1–45, 2014.
- [9] L. A. Camacho, "La torre de Babel: ¿el primer radiotelescopio del mundo?," no. September, pp. 0–5, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.2225.5849.
- [10] C. R. MINAET, *Decreto 35884- MINAET*, vol. 1, no. 1, pp. 35–38, 1995.
- [11] L. Cuervo González, *El falso espejo de la ciudad latinoamericana*. 2005.
- [12] F. Alpizar, M. Piaggio, and E. Pacay, "Valoración económica de los beneficios en la salud asociados a la reducción de la contaminación del aire. El caso de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica," p. 60, 2017, [Online]. Available: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43184/1/S1700555_es.pdf.
- [13] Naciones Unidas/CEPAL, "Informe de avance cuatrienal sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe," pp. 1–234, 2019, [Online]. Available: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44551/S1900433_es.pdf?sequence=7&isAllowed=y.
- [14] J. Ford and L. Gomez-Lanier, "Are Tiny Homes Here to Stay? A Review of Literature on the Tiny House Movement," *Fam. Consum. Sci. Res. J.*, vol. 45, no. 4, pp. 394–405, 2017, doi: 10.1111/fcsr.12205.
- [15] S. Mangold and T. Zschau, "In search of the 'Good Life': The appeal of the tiny house lifestyle in the USA," *Soc. Sci.*, vol. 8, no. 1, 2019, doi: 10.3390/socsci8010026.
- [16] D. Washburn and U. Sindhu, "Helping CIOs Understand 'Smart City' Initiatives," *Growth*, p. 17, 2009, [Online]. Available: <http://c3328005.r5.cf0.rackcdn.com/73efa931-0fac-4e28-ae77-8e58ebf74aa6.pdf>.
- [17] A. Frohmann, N. Mulder, and X. Olmos, "Promoción de la innovación exportadora instrumentos de apoyo a las pymes," *Com. Económica para América Lat. y el Caribe*, p. 186, 2018, [Online]. Available: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43363/1/S1701299_es.pdf.

- [18] J. B. Gutiérrez, "Soluciones de transporte, trailers y remolques," 2014, [Online]. Available: <http://repository.ean.edu.co/handle/10882/5906>.
- [19] J. Valdivieso and S. Andino, "Análisis y comparativa de un remolque con suspensión neumática abatible y un remolque convencional para el transporte de vehículos livianos," *Rev. Caribeña Ciencias Soc.*, no. 2018-05, 2018.
- [20] M. Yolanda and R. Morales, "Análisis de las características y capacidad de diseño de los vehículos de carga considerando la potencia y torque del motor del vehículo," no. 412, 2014.
- [21] A. I. Zamora Torres and O. H. Pedraza Rendón, "El transporte internacional como factor de competitividad en el comercio exterior," *J. Econ. Financ. Adm. Sci.*, vol. 18, no. 35, pp. 108–118, 2013, doi: 10.1016/S2077-1886(13)70035-0.
- [22] N. Fairclough, "Language and globalization," *Semiotica*, vol. 2009, no. 173, pp. 317–342, 2009, doi: 10.1515/SEMI.2009.014.
- [23] R. Flores, A. Martínez, and J. Samá, "Análisis por elementos finitos de cargas de impacto. Estudio de caso de viga de tren de rodaje de remolque agrícola," *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 18, pp. 21–27, 2009, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93212367005>.
- [24] A. Y. Cisternas, A. Moya, and B. Diezma, "Novedades en remolques agrícolas y cisternas," no. Figura 2, pp. 24–36.
- [25] M. Anaconda Perdomo, "La vivienda contenedor, una oportunidad para la construcción de unidades habitacionales sustentables y de bajo costo en Colombia," pp. 1–174, 2020.
- [26] A. Hutagalung, *The Small House Book*. 1967.
- [27] M. Espejo and J. Dahinden, "Arqueología 1 del futuro," pp. 19–24, 2004.
- [28] Y. L. A. M. D. E. Salud, "Alcance No 43 a La Gaceta No 131," 2006.
- [29] E. N. C. Rica and C. R. Mopt, "Consideraciones Sobre La Normativa De Pesos Y Dimensiones Para Vehículos Y Transporte De Carga."
- [30] K. Kiran, B. Anjaneyulu, K. K. Ku, and G. N. Rao, "Design and Analysis of Four Wheeler Car Bumper," vol. 6, no. 12, pp. 3702–3712, 2016.
- [31] Naciones Unidas/CEPAL, *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales*. 2019.
- [32] J. Bravo Bravo, "Así en la cocina como en la fábrica," *Feminismo/s*, no. 17, pp. 183–211, 2011, doi: 10.14198/fem.2011.17.09.
- [33] R. Padilla-Pérez and N. Oddone, "Metodología para el fortalecimiento de cadenas de valor," pp. 113–148, 2017, doi: 10.18356/ce427709-es.

El manejo forestal del bosque secundario como alternativa de uso de la tierra en la zona norte de Costa Rica

Forest management of secondary forest as an alternative land use in the northern zone of Costa Rica

Ronny Villalobos-Chacón¹

Villalobos-Chacón, R. El manejo forestal del bosque secundario como alternativa de uso de la tierra en la zona norte de Costa Rica². *Tecnología en Marcha*. Vol. 35, especial V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado. Junio, 2022. Pág 70-78.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6237>

- 1 Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: ronny.villalobos.chacon@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2606-5286>
- 2 Artículo basado en la tesis de maestría del autor. Disponible en: https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/12237/TFG_Ronny_Villalobos_Chac%C3%B3n.pdf?isAllowed=y&sequence=1

Palabras clave

Aprovechamiento forestal; líderes deseables; tratamientos silviculturales.

Resumen

Los bosques secundarios tienen un gran potencial de manejo como generador de recursos y servicios para la sociedad. La producción de madera sigue siendo un recurso ampliamente utilizado y como una alternativa viable. El presente estudio se realizó en tres bosques secundarios de la región Huetar Norte Costa Rica, en las localidades de Florencia, Pénjamo de Florencia y Agua Zarcas. Estos bosques habían sido evaluados hace dos décadas y se les aplicó tratamientos silviculturales, sin embargo, nunca fue evaluado su efecto sobre la masa forestal, por tal motivo este estudio tiene con objetivo: evaluar el efecto de la aplicación de tratamientos silviculturales sobre especies comerciales. A partir de un muestreo diagnóstico y re-medición de parcelas permanentes se estimaron cambios por efecto de la aplicación de tratamientos en la composición florística, estructura, incrementos dasométricos en especies comerciales y no comerciales; se evaluaron cambios sobre los líderes deseables sobresalientes, las estimaciones se compararon con el bosque testigo en Florencia y Pénjamo solamente. Los tres bosques presentaron cambios satisfactorios en sus variables dasométricas, estructura y composición atribuidos al efecto sobre la aplicación de tratamientos y su manejo previo, sin embargo, es importante volver a intervenirlos y monitorear su comportamiento de forma periódica.

Keywords

Forest harvesting; desirable leaderships; silvicultural treatments.

Abstract

Secondary forests have great management potential as a generator of resources and services for society. Wood production remains a widely used resource and a viable alternative. The present study was carried out in three secondary forests in the Huetar Norte region of Costa Rica, in the towns of Florencia, Pénjamo de Florencia and Agua Zarcas. These forests have been evaluated for two decades and silvicultural treatments were applied to them, however, their effect on the forest mass was never evaluated, for this reason this study aims to: evaluate the effect of the application of silvicultural treatments on commercial species. From a diagnosis of sampling and measurement of permanent plots, changes were estimated due to the effect of the application of treatments in the floristic composition, structure, dasometric increases in commercial and non-commercial species; changes on the outstanding desirable leaders were evaluated, the estimates were compared with the forest control in Florencia and Pénjamo only. The three forests presented satisfactory changes in their dasometric variables, structure and composition attributed to the effect on the application of treatments and their previous management, however, it is important to intervene again and monitor their behavior periodically.

Introducción

Los bosques secundarios se originan en los años 80's, donde miles de hectáreas de pastizales fueron abandonadas por la disminución en la rentabilidad de la ganadería y por la degradación de los suelos. Justamente ese abandono, permitió la recuperación de las áreas.

Entre 1990 y 1999 se desarrollan las primeras experiencias de manejo forestal en la Región Huetar Norte con el fin de elaborar un paquete tecnológico para el manejo sostenido del bosque secundario. Sin embargo, para lograrlo es necesario primero saber si realmente la aplicación de

tratamientos silviculturales tiene algún efecto positivo sobre el crecimiento de la masa forestal comercial y de esta manera brindar más opciones que potencien los ingresos económicos. A pesar de los esfuerzos, esta idea no se logró concretar y aún sigue siendo una necesidad.

Debido a esta situación la Administración Forestal del Estado (AFE), en forma muy acertada establece el Decreto Ejecutivo N° 27998-MINAE: Principios criterios e indicadores para el Manejo Sostenible de Bosques Secundarios que permitiría desarrollar alternativas sostenibles de uso de la tierra para los propietarios de tierras con zonas de bosque secundario como un elemento a considerar en la estructura de las propiedades [1].

Para finales del 2010 se inició con un nuevo borrador basado en el decreto antes mencionado y sus últimas modificaciones fueron realizadas en el 2015. Desde entonces, este estándar de manejo se ha puesto en práctica en cuatro planes de manejo en la región Huetar Norte. Pero aún no ha pasado suficiente tiempo tener resultados confiables y concluir el efecto en términos de rendimiento, cuál es la técnica más apropiada y sus verdaderos impactos.

En este sentido el manejo forestal sostenido del bosque secundario permite, por la aplicación de diversas técnicas, promover la utilización de aquellas áreas de bosques que, por sus características y evaluaciones previas, son susceptibles al manejo forestal sostenible. La incorporación productiva del bosque secundario permitiría contribuir, entre otras cosas, a un flujo de ingresos para el propietario, abastecer al país de madera proveniente de fuentes sostenibles y un aporte en otros bienes y servicios brindados.

Como línea base para responder a lo anterior, fue necesario efectuar evaluaciones silviculturales de los tres bosques secundarios de la Región Huetar Norte. El objetivo de estas evaluaciones fue: evaluar el efecto de la aplicación de tratamientos silviculturales sobre la composición florística, estructura, variables dasométricas y su efecto sobre los líderes deseables. Todos los tratamientos aplicados (cosecha, liberación, refinamiento y corta de lianas) tenían en la primera evaluación la finalidad de provocar cambios en la estructura del bosque, favorecer el crecimiento y la abundancia de las especies comerciales con el fin último de incrementar la productividad, aspecto que se reflejará en el siguiente ciclo de corta y en las reservas de madera en la cosecha futura [2].

Metodología

Área de estudio

Los bosques secundarios que se estudiaron fueron tres y corresponden a bosques de diferentes edades o fases de desarrollo, ubicadas en el caserío de Florencia, Penjamo y Coope San Juan del distrito de Florencia y Agua Zarcas del cantón de San Carlos provincia de Alajuela. Exhiben un régimen climático típico del bosque muy húmedo tropical pre montano con precipitaciones en 2000-4000 mm anuales, humedad relativa entre los 80%-85% y temperaturas promedio anuales de 17-25 °C.

Diseño de muestreo, selección de sitios y distribución de las unidades de muestreo

Los tres bosque secundario seleccionados fueron sometidos a diferentes tipos de tratamientos silviculturales en el caso del bosque de Florencia este fue sometido a aprovechamiento, refinamiento, liberación y corta de lianas; por otra parte el bosque de Pénjamo fue sometido solamente a la corta de lianas y bejuco y al bosque de Coope San Juan se le aplico aprovechamiento y corta de lianas solamente. En su momento fueron establecidas parcelas permanentes de monitoreo (PPM) de 500 m² y parcelas de muestreo diagnóstico de 100 m².

El bosque Florencia se encuentra en una propiedad de 18 ha dentro de la cual el bosque secundario sujeto a la aplicación de tratamientos tuvo una superficie de 5,6 ha. Esta área fue segmentada en 2 bloques el primero con un tamaño de 1,7 ha que fue dedicado a la siembra de frijoles (aproximadamente hace 38 años), el segundo bloque de 3,9 ha que había sido dedicado para la siembra de yuca (aproximadamente hace 28 años); posteriormente se dejaron de cultivar, dando origen al bosque en estudio. Además se consideró un sector de 6,4 ha como bosque testigo, este fue originado en el mismo tiempo y tuvo el mismo uso del suelo.

Se re-establecieron 5 PPM de 500 m² (20 m x 25 m), 2 en un estrato (intensidad de muestreo de 6%) y 3 unidades de muestreo en un segundo estrato (4% de intensidad de muestreo). Así mismo se estableció de manera temporal un total de 37 parcelas para muestreo diagnóstico de 100 m² (10 m x 10 m) con una intensidad de 7%. En el bosque testigo se establecieron el mismo de parcelas permanentes de 500 m² y un total de 24 parcelas de muestreo diagnóstico para una intensidad de muestreo del 3,7 %

El bosque de Pénjamo, Corresponde a una propiedad de 18 ha, donde 9,31 ha son de bosque secundario; 5,4 ha corresponden al bosque testigo. Se re-establecieron 3 PPM de 500 m² (20 m x 25 m), para un 4% de intensidad de muestreo. Así mismo se estableció de manera temporal un total de 41 parcelas para muestreo diagnóstico de 100 m² (10 m x 10 m) con una intensidad de 10%. En el testigo se establecieron 5 parcelas permanentes de 500 m² y 45 parcelas para muestreo diagnóstico.

Por último el bosque de Coope San Juan, corresponde a una propiedad de 416 ha de las cuales 258 ha son bosques, el área evaluada corresponde a 8,4 ha de bosques secundarios, compuesto por tres bloques (bloque I de 2,1 ha, bloque II de 4,52 ha y bloque III de 1,79 ha). En cada bloque, en su primera evaluación se realizó un muestreo diagnóstico que siguió la metodología de Hutchinson, donde se establecieron parcelas temporales de 10 x 10 m en forma consecutiva y de un largo variado hasta completar la intensidad de muestreo según el área del bosque evaluado. En este muestreo se midieron e identificaron todos los árboles mayores a 10 cm de diámetro con el fin de identificar árboles líderes deseables. Así mismo, se establecieron parcelas permanentes de monitoreo (PPM) de 500 m².

Criterios de evaluación en los Bosques Secundario

Una vez re-establecida cada parcela en los bosques secundarios se evaluó sobre estos dos aspectos: (i) condiciones morfológicas de cada uno de los árboles presentes en la PPM de 500 m² y (ii) presencia de líderes deseables (LD) en la totalidad de los bosques secundarios, los cuales se determinaron por medio de un muestreo diagnóstico del bosque secundario a través de parcelas temporales de 100 m², es importante mencionar que para efectos de los resultados de este estudio solo se abordarán los de las condiciones morfológicas (especies, diámetro, altura, gremios ecológicos, riqueza, diversidad florística, distribución diamétrica y área basal) de acuerdo a metodologías como las de Lamprecht [3].

Análisis de los datos e información de campo para la comparación de sitios con aplicación de tratamientos silviculturales y sin aplicación de tratamientos

Toda la información recopilada (información de parcelas permanentes) se unificó en una base de datos, posteriormente se utilizó el Programa ANAEST 2003 (es una hoja de cálculo de Excel, desarrollado por el Instituto de Investigación y Servicios Forestales de la Universidad Nacional de Costa Rica) para determinar la riqueza, abundancia, dominancia, frecuencia. Así mismo se calcularon los siguientes índices y valores:

Índice de Shannon- Wiener, índice de Simpson, densidad, índice de Bray-Curtis.

Comparación de los resultados y análisis de los datos

Para uno de los parámetros dasométricos se registró el cambio ocurrido en el valor de la segunda evaluación con respecto a primera Morales [2], Quirós [4] y se comparó entre los mismos sitios donde no se aplicaron tratamientos (bosque secundario testigo). Para llevar a cabo dicha comparación se establecieron la misma cantidad de unidades de monitoreo (500 m² y 100 m² para muestreo diagnóstico) y se registraron todas las variables descritas anteriormente.

Seguidamente, se realizó un análisis de varianza para el área basal y volumen de los bloques de bosque evaluados.

Se realizó la predicción de las curvas de acumulación de especies por área de muestreo en el software EstimateS 9.1 y la prueba de Wilcoxon (Mann-Whitney U) en el software Infostat en su versión 2020. Para esto se utilizaron los datos obtenidos en el muestreo diagnóstico para ambos sitios. En el caso de Florencia se utilizaron 37 unidades de muestreo del bosque evaluado y 24 del bosque testigo, mientras que para Pénjamo se utilizaron 41 del bosque evaluado y 45 del testigo; cada una de las unidades con un área de 100 m².

Para eliminar el riesgo de que los resultados obtenidos sean producto del orden espacial de los datos al ser ingresados al programa, los estimadores fueron calculados 100 veces con aleatorizaciones del orden de las unidades de muestreo y el resultado que se muestra para cada estimador es el valor promedio de estas.

Seguidamente, se estimó el índice de completitud (C), el cual puede interpretarse como la representatividad o nivel de conocimiento obtenido en el muestreo realizado con respecto a un valor "real" modelado, y se basa en la relación existente entre la riqueza observada (Sobs) y la riqueza estimadas (Sest) expresadas en porcentaje.

Resultados y discusión

La edad de los bosques cuando se aplicaron los tratamientos silviculturales era de: Florencia Estrato I 10 años, Florencia estrato II 18 años, Pénjamo 25 años, y Coope San Juan 23 años. Existe un gradiente entre la edad de aplicación del tratamiento y la edad para cuando se realizó la valuación de este trabajo sin embargo y por lo difícil que es hacer investigación y obtener resultados a largo plazo este estudio se considera uno de los primeros que permitirá determinar los efectos de la aplicación de tratamientos en años posteriores.

Solo en el bosque de Florencia y Pénjamo fue posible hacer una comparación tomando como referencia el bosque testigo; en el bosque Coope San Juan no fue posible, así mismo el bloque III no fue considerado ya que al momento de la evaluación posterior al tratamiento se comprobó la corta y extracción de madera, se evitó generar un sesgo en los datos de campo. Los resultados de la presente investigación muestran la composición florística, estructural, variaciones del volumen y la dinámica de los Líderes Deseables.

Cambios en composición florística

El bosque de Florencia y Pénjamo presentaron cambios en familias y especies. En la primera evaluación *Cordia alliodora* y *Vismia ferruginea* eran las más abundantes; estas son especies pioneras que sufren un proceso de transición de pasto o agricultura a bosque, posteriormente estos sitios pasaron a ser dominados por la familia Vochysiaceae, de acuerdo con [2] las especies más predominantes son *Vochysia guatemalensis* y *V. ferruginea* de la familia en mención, su abundancia está sujeta al nivel de desarrollo y manejo del bosque, la apertura de claros es una condición que favorece la competencia y el desarrollo. En el bloque I del bosque de Florencia se ejecutaron tres tratamientos (liberación, corta de bejucos y refinamiento) y

cuatro en el bloque II (liberación, corta de bejucos, refinamiento y aprovechamiento o cosecha), el refinamiento y aprovechamiento generó claros y alteraciones en la composición florística, favoreciendo especies de valor comercial, dentro de las cuales *V. guatemalensis* fue la más promovida.

El grupo ecológico de heliófitas efímeras es el grupo más dominante en los primeros estadios de desarrollo, luego son sustituidas por heliófitas durables que en los tres bosques tratados llegaron a superar el porcentaje de las primeras, así mismo las esciófitas constituyen un indicador de bosque secundario tardío [5]. El porcentaje o abundancia entre gremios se verá modelado en gran medida al manejo que se lleva a cabo en los sitios, Spittler [6]. El porcentaje menor de esciófitas en los bosques evaluados tratados comparado con un periodo posterior o con el bosque testigo podría atribuirse al manejo y apertura de claros debido al refinamiento y aprovechamiento, como es el caso del bosque de Florencia, que muestra un ejemplo de esta transformación en los porcentajes de abundancia de gremios ecológicos.

Así mismo, el bosque Florencia antes y después de la aplicación de tratamientos, comparado con el bosque testigo presenta resultados disímiles, la diversidad muestra variaciones significativas, además, según el índice de Simpson los valores cercanos a cero y representan una alta diversidad, por lo que los datos reflejan que el bosque testigo presenta alta diversidad de especies de acuerdo a Hernández [7], en relación con su equivalente una vez manejado. Sucede el mismo comportamiento entre los periodos de evaluación y el bosque testigo, donde el bosque manejado presenta menor diversidad; Valerio y Salas [8] afirman que la aplicación de tratamientos genera riesgos de disminuir la diversidad y proporción de especies de árboles, si la aplicación de éstos no ha sido debidamente planificada, lo que amenaza la estabilidad del bosque.

Para determinar la intensidad de mezcla de las especies presentes en los bosques evaluados, se calculó el Cociente de Mezcla, definido por Lamprecht [9], como la relación unitaria del número de especies respecto al total de individuos presentes en un bosque; el sitio evaluado presenta una mayor intensidad de mezcla y por ende mayor diversidad de especies, según resultados solamente el bosque de Pénjamo en la evaluación años posteriores presenta diferencias significativas en relación al bosque testigo donde este último presenta mayor cantidad de especies, mismo comportamiento se observa en el bloque II de Coope San Juan.

De acuerdo al índice de valor de importancia, se nota la variabilidad del mismo entre especie, periodo y bosque, no hay una tendencia en el comportamiento del IVI, ya que ocurre un proceso de transición donde las especies que dominaban una etapa se tornan menos abundantes y frecuentes en las siguientes etapas de desarrollo.

En cuanto a la frecuencia relativa (%), según Lamprecht [9], se refiere a la presencia de una especie en un sitio de muestreo, abundancias mayores a 3% indican que el bosque es homogéneo y la posibilidad de encontrarse una especie repentinamente es alta, todos los sitios evaluados presentan una alta homogeneidad, Un caso especial es el bosque de Coope San Juan, debido a que presenta una condición particular donde existe 10-20% de probabilidad de que si una especie es seleccionada al azar esta sea *Pentaclethra macroloba*.

Según el índice de similaridad de Bray Curtis, el bloque I de Florencia y el bosque de Pénjamo comparados con el bosque testigo llegan solo a un 30% de similaridad que coincide también con una reducción de la diversidad de especies en el bosque una vez manejado y un aumento en el bosque testigo. Lo que indica que la aplicación de tratamientos produjo un cambio en la composición florística.

El estimador de Bootstrap fue el único con valores de completitud superiores al 80 % en todas las estimaciones realizadas, lo que sugiere que este es el que más se ajusta a los datos del muestreo, como podemos ver en la figura 1. Además, se mantiene dentro del 20% de error aceptado.

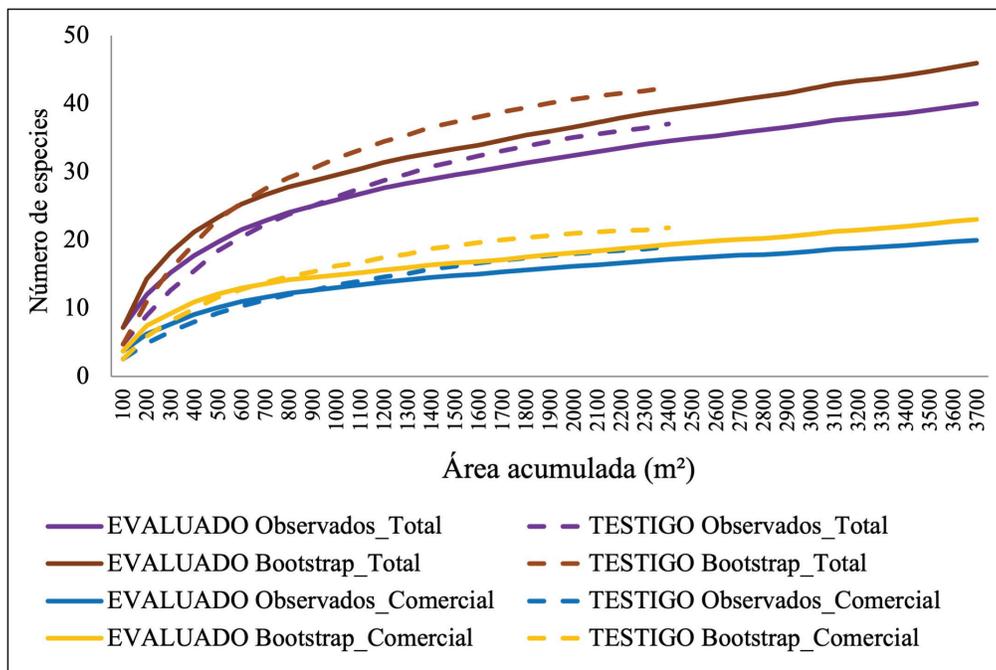


Figura 1. Curva de acumulación de especies comerciales y totales por área, de acuerdo al número de especies observadas y estimadas con el índice de Bootstrap para el bloque I de Florencia, San Carlos, Costa Rica.

En todos los casos las curvas del bosque testigo son superiores a las del bosque evaluado, sugiriendo que el bosque testigo es el que posee la mayor riqueza de especies, esto en áreas inferiores a 700 m², antes de llegar a este punto es el bosque evaluado quien posee la mayor acumulación de especies y donde se encuentra la mayor pendiente en la curva. Las curvas estimadas con Bootstrap son superiores a las obtenidas con los datos observados; el desplazamiento entre las curvas estimadas y las observadas representan el porcentaje de representatividad faltante para que el índice de completitud sea igual al 100 %. En este caso, todas las curvas se encuentran dentro del 20% de error recomendado por la literatura.

Cambios en la estructura horizontal, vertical y volumen del bosque

La tendencia de incrementos en variables dasométricas como el volumen y área basal puede atribuirse a la aplicación de los tratamientos ejecutados. Estos incrementos se concentran en las especies comerciales, aspecto que debe resaltarse por la importancia que tiene para dar opciones a los propietarios de bosques secundarios y una baja en las especies no comerciales [10].

Los valores dasométricos se encuentran igual o por encima de otros bosques evaluados y/o incluso aprovechados. Según Spittler [6], se estima que un bosque secundario de 12 años en la Zona Norte de Costa Rica alcanza áreas basales de 17,8 m²/ha, por su parte Chazdon et al [11], reportan que a los 25 años los bosques secundarios de las zonas húmedas pueden alcanzar áreas basales de 21 m²/ha hasta 35,5 m²/ha. Los incrementos en área basal comercial desde la primera medición pueden atribuirse a que en la primera evaluación el bosque estaba en una etapa de sucesión temprana y predominaba mayor abundancia de especies no comerciales

o HE en las primeras categorías diamétricas. Hoy día hay un incremento en la densidad de especies comerciales en todas las clases diamétricas, por consiguiente, los resultados indican que los tres bosques se encuentran en un estadio tardío.

La densidad de individuos/ha, en los bosques estudiados se concentra en las clases diamétricas de 10 a 20 cm y de 20 a 30 cm; datos similares a los que reportó Abarca et al, [12] para bosques secundarios estudiados en la región de Sarapiquí, Costa Rica.

Si bien es cierto los tres bosques presentaron cambios satisfactorios en sus variables dasométricas, estructura y composición es necesario volver a intervenirlos y monitorear su comportamiento de forma periódica con el fin de tener mejor validación de los resultados.

El bosque de Florencia y Pénjamo al ser comparados con su respectivo bosque testigo registraron incrementos en las especies comerciales en todas sus clases diamétricas.

De acuerdo con la prueba no paramétrica de Wilcoxon (Mann-Whitney U), para el caso de Florencia existen diferencias significativas (p -valor $< 0,05$) en las variables densidad de individuos totales y comerciales y cantidad de especies totales y comerciales; mientras que para el resto de variables no existen diferencias significativas (p -valor $> 0,05$), para el caso de Pénjamo no obtuvieron diferencias significativas (p -valor $> 0,05$) en ninguna de las variables comparadas

Efecto de la aplicación de los tratamientos silviculturales

Los líderes deseables (LD) incrementaron significativamente en el bosque de Florencia; el aumento de LD pasó de 56 a 70 individuos por hectárea. Además, en promedio el 63% de los individuos evaluados según posición, forma y afectación por bejucos se ubican en las categorías de 1 a 2, que son considerados de perfecta a buena condición.

No solo se registró una mayor cantidad con respecto a los otros bosques evaluados, sino que las condiciones y características de los mismos con respecto a forma de copa e iluminación es mejor. Dicho comportamiento, se debe a que fue donde se aplicaron cuatro tratamientos en vez de uno, el refinamiento fue uno de los aplicados y este mejoró la condición de los individuos en relación al bosque Pénjamo y Coope San Juan en los que solo se les aplicó corta de bejucos. La liberación busca favorecer el crecimiento de los LD a partir de la eliminación de árboles sin valor comercial.

La combinación de aprovechamiento, corta de bejucos, refinamiento y liberación resultó beneficiosa en la cantidad y las condiciones de los LD en el bosque de Florencia, comparado con solo la corta de bejucos en los otros dos bosques.

Conclusiones

La presente investigación retoma el tema del manejo forestal del bosque secundario como una alternativa ingreso económico a sus propietarios. Además, constituye un insumo como línea base para el futuro manejo de los bosques secundarios de la zona norte y sobre aquellos a los cuales se les aplicó algún tratamiento silvicultural.

El bosque de Florencia y Pénjamo comparados con el bosque testigo registraron incrementos en el número de especies comerciales en todas sus clases diamétricas. Y los cambios en la composición florística, en todos los casos, el bosque una vez manejado disminuyó su diversidad según los índices considerados.

Según las pruebas no paramétricas realizadas y las curvas de acumulación de especies, el bosque de Florencia y Pénjamo tuvieron efectos significativos una vez llevado a cabo los diferentes tratamientos silviculturales.

La tendencia de incrementos en variables dasométricas como el volumen y área basal puede atribuirse a la aplicación de los tratamientos ejecutados, estos incrementos se concentran en las especies comerciales y una baja en las especies no comerciales.

Si bien, los tres bosques evaluados presentaron cambios satisfactorios en sus variables dasométricas, estructura y composición, es necesario volver a intervenirlos y monitorear su comportamiento de forma periódica con el fin de tener mejor validación de los resultados.

Referencias

- [1] L, Henao, (2015, Set, 14). El bosque secundario en Centroamérica. Un recurso potencial de uso limitado por procedimientos y normativas inadecuadas. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/11554/7242>
- [2] M, Morales, "Lineamientos para el manejo de un bosque secundario a partir de una evaluación silvicultural, Florencia, San Carlos, Costa Rica", Costa Rica, 1998.
- [3] L, Vargas, "Análisis de una Cronosecuencia de Bosques Tropicales del Corredor Biológico Osa, Costa Rica", Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2012
- [4] S, Quirós, "Determinación y Aplicación de Tratamientos Silviculturales en un Bosque Secundario, Pénjamo, Florencia, San Carlos, Costa Rica", Costa Rica, 1999.
- [5] L, Chiari, "Prescripción y aplicación de tratamientos silviculturales en bosques secundarios en Boca Tapada de Pital, San Carlos, Alajuela, Costa Rica", Costa Rica, 1999.
- [6] P, Spittler. (2001, Feb, 9). Potencial del bosque secundario de la zona seca del noreste de Costa Rica. . [Online]. Available: <https://copa.acguanacaste.ac.cr>
- [7] I, Hernández, "Cambios en la estructura y composición del bosque bajo dos tratamientos silviculturales en la Comunidad de Capulálpam de Méndez, Ixtlán, Oaxaca, México", Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica, 2008
- [8] J, Valerio; C, Salas, C. (1997, Oct, 11). Selección de prácticas silviculturales para bosques tropicales. [Online]. Available: <https://rmportal.net>
- [9] H, Lamprecht, "Silvicultura en los trópicos: Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas; posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido", España, 1990.
- [10] J, Leiva, "Comparación de las Estrategias de Regeneración Natural entre los Bosques Primarios y Secundarios en las zonas bajas del Atlántico Costarricense", Costa Rica 2001
- [11] R, Chazdon; B, Vilchez; V, Villa. "Dinámica de cuatro bosques secundarios tropicales de la región Huetar Norte, Costa Rica, su valor para la conservación o uso comercial". Revista Recursos naturales y ambiente, vol. 55, pp.118-128. Enero 2008.
- [12] P, Abarca; V, Meza; G, Méndez. "Evaluación de tratamientos silviculturales en la sostenibilidad de bosques tropicales en la Región Huetar Norte, Costa Rica". Revista Ambientales. vol.46. pp. 140-166. Junio 2020