

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Dirección de Proyectos
Informe final de proyectos de investigación y extensión

Título

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

Investigadores

Dr. Dagoberto Arias Aguilar (coordinador)

Ing. Nelson Zamora Villalobos

Máster Casia Soto Montoya

M. Sc. María Rodríguez Solís

Máster Arnoldo Ramírez Jiménez

Dr. Ernesto Montero Zeledón

2020-2022

1 Tabla de contenido

1	Tabla de contenido	ii
2	Índice de cuadros.....	vi
3	Índice de figuras	vii
4	Código y Título del proyecto	10
5	Autores y direcciones	10
6	Resumen.....	11
6.1	Resumen en español.....	11
6.2	Abstract	11
6.3	Keywords	12
7	Introducción	12
8	Objetivos	14
8.1	Objetivo general.....	14
8.2	Objetivos específicos.....	14
9	Métodos de investigación utilizados	15
10	Marco Teórico.....	15
11	Metodología	18
11.1	Metodología contemplada para el primer objetivo específico OE1	18
11.1.1	Requerimientos generales.....	19
11.1.2	Desarrollo prototipo con cámara hiperespectral.....	19
11.1.3	Validación del funcionamiento.....	19
11.2	Metodología contemplada para el segundo objetivo específico OE2	20
11.2.1	Sitios de estudio.....	20
11.2.2	Selección de especies.....	20
11.2.3	Colecta del material foliar	21

11.2.4	Colecta del material leñoso (madera)	21
11.2.5	Medición de firma hiperespectral con equipos comerciales.....	21
11.2.6	Medición colorimétrica con equipos comerciales	22
11.2.7	Análisis de resultados	22
11.3	Metodología contemplada para el tercer objetivo específico OE3.....	23
11.4	Metodología contemplada para el cuarto objetivo específico	24
11.5	Metodología para las nuevas actividades a desarrollar dentro del OE2.	24
11.5.1	Producto 1: Estimación de índices de vegetación y predicción de biomasa en plantaciones.....	24
11.5.2	Área de estudio	25
11.5.3	Diseño experimental.....	25
11.5.4	Datos de campo	25
11.5.5	Obtención de imágenes.....	26
11.5.6	Procesamiento de datos	26
11.5.7	Cálculo de índices espectrales	27
11.5.8	Análisis estadístico	27
11.6	Metodología para las nuevas actividades a desarrollar para el Producto 2: Estudios de biomimética.....	28
11.6.1	Sitio de estudio	28
11.6.2	Evaluación radiométrica	29
11.6.3	Medición de la concentración de nutricional foliar	29
11.6.4	Evaluación colorimétrica.....	29
11.6.5	Otras características de las hojas	30
11.6.6	Estrategias estáticas y mecanismos dinámicos de las hojas	30
11.7	Metodología para las nuevas actividades a desarrollar para el Producto 3: Identificación automática de maderas tropicales.....	32
12	Resultados	33

12.1	OE1. Desarrollar un dispositivo de medición hiperespectral para caracterizar la fisiología y anatomía de especies arbóreas tropicales.	33
12.1.1	Diseño de un dispositivo inicial basado en una cámara (TFG Oscar Ortega de Mecatrónica).....	33
12.1.2	Desarrollo del sistema de visión hiperespectral para el estudio de especies arbóreas tropicales (tesis del Ing. Arnoldo Ramírez).....	37
12.1.3	Automatización de un sistema de visión hiperespectral para hojas de especies forestales (TFG Paulina Mendez)	40
12.1.4	Principales conclusiones OE1	44
12.2	OE2. Procesar las imágenes de las especies para generar datos hiperespectrales y anatómicos de las especies de estudio con alta precisión (93%).....	46
12.2.1	Artículo Uso del aprendizaje profundo para identificar especies de árboles nativos de Costa Rica a partir de imágenes de cortes de madera.....	46
12.2.2	Ampliación y producto 1 del OE2: Definición de un método indirecto para la estimación de la productividad y biomasa arriba del suelo en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> L. (teca), mediante la utilización del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el de diferencia normalizada verde (GNDVI) y ajustado al suelo (Savi) 47	
12.2.3	Resultados del primer artículo “Estudio de la productividad y biomasa arriba del suelo, mediante el uso de índices de vegetación en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> L. (Teca) ubicadas en Guanacaste, Costa Rica”	47
12.2.4	Resultados del segundo artículo del producto 1: Modelos alométricos para la estimación de volumen y biomasa en una plantación forestal de <i>Tectona grandis</i> l.f., mediante imágenes satelitales Sentinel-2.....	48
12.2.5	Resultados del tercer artículo del producto 1: Comparación de herramientas tecnológicas para determinar índices de vegetación en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> , Guanacaste, Costa Rica.....	73
12.2.6	Ampliación y producto 2 del OE2: Análisis de la función de la hoja desde la biomimética a través de los mecanismos y las estrategias estáticas para comprender mejor su interacción con la luz y las futuras aplicaciones en el diseño ecológico. Beca CENAT. 95	
12.2.7	Ampliación y producto 3 del OE2: Caracterización de un grupo de especies maderables bajo amenaza de extinción por medio visión artificial y el uso del Xylotron (actividades conjuntas con el Servicio Forestal de Estados Unidos). Convenio USFS/IP-FUNDATEC.....	109

12.3	OE3. Generar modelos de diferenciación fisiológica para manejo y conservación a partir de las caracterizaciones hiperspectrales anatómicas y colorimétricas.....	114
12.3.1	Resumen del artículo publicado sobre Diferenciación de especies arbóreas tropicales con mediciones foliares de reflectancia hiperspectral	114
12.3.2	Principales resultados del artículo de diferenciación de especies	115
12.3.3	Resumen del artículo publicado sobre Fluorescencia, reflectancia y respuesta fisiológica al estrés hídrico en <i>Gmelina arborea</i>	116
12.3.4	Resumen del artículo publicado sobre Identificación de patrones de reflectancia espectral y colorimétricos en madera seca de <i>Peltogyne purpurea</i> Pittier. 116	
12.3.5	Avances en los análisis de nuevos datos para un nuevo artículo científico .	117
12.4	OE4. Proponer los indicadores fisiológicos a partir las variables analizadas como mecanismo de identificación botánica.	120
12.4.1	Taller: Instrumentación para el entendimiento de la reflectancia en árboles del trópico mesoamericano.....	121
12.4.2	Taller de Co-Ideación: “Biomimética de Árboles Tropicales”	124
13	Propuestas de nuevos proyectos de investigación que incidan en la conservación de especies forestales en diferentes grados de amenaza para su conservación.	131
13.1	Nuevo proyecto: “Fortalecimiento del control gubernamental sobre el trasiego ilegal de maderas mediante el uso de tecnologías de análisis de autenticación: uso del XyloTron en Costa Rica”	131
13.1.1	Resumen	132
13.2	Nueva propuesta: Integración de herramientas tecnológicas para apoyar el manejo, conservación y reducción de la tala ilegal de especies maderables de Costa Rica	132
13.2.1	Resumen	133
14	Principales conclusiones	133
15	Recomendaciones.....	134
16	Agradecimientos.....	135
17	Referencias	136
18	Apéndice	137

2 Índice de cuadros

Cuadro 1. Tratamientos aplicados en el estudio	25
Cuadro 2. Índices en el estudio. R:Reflectancia; NIR: banda de infrarrojo; r:banda roja; v:banda verde; L:constante (0,5 en este caso).	27
Cuadro 3. Parametrización de la cámara.....	36
Cuadro 4. Características originales de las bandas del sensor Sentinel 2A, utilizadas en este estudio.	56
Cuadro 5. Índices de vegetación calculados y sus ecuaciones correspondientes.....	56
Cuadro 6. Estadísticas descriptivas de los parámetros forestales utilizados en el estudio.....	58
Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los parámetros forestales (volumen, biomasa forestal aérea y biomasa forestal total) y variables espectrales.....	59
Cuadro 8. Modelos de regresión generados, con sus respectivos estadísticos de ajuste.	60
Cuadro 9. Estimados de productividad obtenidos con los modelos generados.....	62
Cuadro 10. Codificación de los tratamientos experimentales.	79
Cuadro 11. Cronograma de adquisición de datos.	79
Cuadro 12. Índices de vegetación calculados y sus ecuaciones correspondientes.....	82
Cuadro 13. Resultados de índices obtenidos.....	83
Cuadro 14. Resultados de ANDEVA y valores promedio de los índices de vegetación estudiados por tratamiento, con sus respectivas diferencias.	85

Cuadro 15. Correlaciones obtenidas para 15 especies estudiadas.....	115
Cuadro 16. Lista de especies evaluadas y localización de los árboles considerados.....	117
Cuadro 17. Accuracy obtenido en la identificación de las especies tanto etapa de entrenamiento como validación	120

3 Índice de figuras

Figura 1. Esquema de proceso ingenieril para abarcar el desarrollo del proyecto.	18
Figura 2. Ubicación de parcelas permanentes para la toma de datos del proyecto.	20
Figura 3. Detalle de los mecanismos dinámicos a nivel de hojas implementados en el estudio.....	30
Figura 4. Detalle de las estrategias estáticas a nivel de hojas empleadas en el estudio	31
Figura 5. Detalle de las estrategias a nivel de hojas empleadas en el presente estudio.....	31
Figura 6. Diagrama de flujo de concepto de diseño para el instrumento hiperspectral. Elaborado por Oscar Ortega.	34
Figura 7. Esfuerzo de VonMises para tornillo en torsión pura. Elaborado por Oscar Ortega.....	34
Figura 8. Esfuerzo de VonMises para tuerca en torsión pura. Elaborado por Oscar Ortega.....	35
Figura 9. Detalles del actuador lineal.....	35
Figura 10. Detalles de ensamblado de la cámara en el laboratorio ECOPLANT	36
Figura 11. Resultado del procesamiento de imágenes de hojas y curva de reflectancia	37
Figura 12. Detalle del dispositivo SpectraTEC desarrollado en el laboratorio ECOPLANT. (A la izquierda el dispositivo y a la derecha la imagen de las bandas espectrales para una hoja).....	39
Figura 13. Detalle de las firmas hiperspectrales de 20 hojas de la especie <i>Handroanthus ochraceus</i> obtenidas con SpectraTEC	40
Figura 14. Modelo 3D del dispositivo desarrollado. Elaborado por Paulina Méndez en Autodesk Inventor.	41

Figura 15. Diseño de un sistema de iluminación para la toma de imágenes. Elaborado por Paulina Méndez.....	42
Figura 16. Detalle del dispositivo funcional que complementa las capacidades del SpectraTEC..	42
Figura 17. Imágenes obtenidas con el módulo de cámara v2 para Raspberry Pi. Elaborado por Paulina Méndez.....	44
Figura 18. Estimación espacial del volumen (m ³) para las plantaciones de <i>Tectona grandis</i> , finca Palo Arco, Panamerican Woods, Guanacaste Costa Rica.	64
Figura 19. Estimación espacial de la biomasa: (a) aérea y (b) total (ton) para las plantaciones de <i>Tectona grandis</i> , finca Palo Arco, Panamerican Woods, Guanacaste Costa Rica.	64
Figura 20. Box plot de valores de NDVI por tratamiento.....	83
Figura 21. Box plot de valores de GNDVI por tratamiento.	83
Figura 22. Diferencias visuales de un ortomosaico RGB obtenido mediante un RPAS (a) y uno obtenido a través de una imagen satelital Sentinel-2 (b).....	87
Figura 23. Detalle de la entrega de equipo Xylotron por parte de la Embajada de Estados Unidos.	110
Figura 24. Arquitectura representativa de la red neuronal (ANN) utilizada para análisis de reflectancia espectral y primera derivada en hojas de 12 especies arbóreas tropicales.....	118
Figura 25. Reflectancia espectral promedio y primera derivada en hojas de 12 especies arbóreas tropicales. Segmento en línea intercalada corresponden a zoom de puntos de interés de las curvas.	118
Figura 26. Distribución de similitud de factor kappa entre valores de reflectancia espectral en hojas 12 especies arbóreas tropicales. (celdas color rosa no muestran significancia, * significancia a 0.05 y ** significancia a 0.01)	119
Figura 27. Distribución de similitud de factor kappa entre valores de la primera derivada de la reflectancia en hojas 12 especies arbóreas tropicales. (celdas color rosa no muestran significancia, * significancia a 0.05 y ** significancia a 0.01).	119

Figura 28. Detalle de la invitación al taller de Instrumentación en modalidad híbrida.....	122
Figura 29. Lista de participantes en el taller: Instrumentación para el entendimiento de la reflectancia en árboles del trópico mesoamericano.....	123
Figura 30. Charla sobre el estudio de la productividad y biomasa, Ing. Arleth Porras Granados (TEC).....	123
Figura 31. Práctica de campo sobre el uso de instrumentación para toma de firmas espectrales. Ings David Romero y Heileen Aguilar (PRIAS CeNAT), Ing. Alejandra Rojas (Biomateriales UCR), Ing. Arleth Porras (estudiante de maestría en Ciencias Forestales TEC).	124
Figura 32. Asistentes al taller en práctica de campo, demostración de equipo para toma de firmas espectrales.	124
Figura 33. Infografías diseñadas por el becario Sebastián a partir de los datos procesados con su tutor Dagoberto para el Taller de Co-Ideación.....	125
Figura 34. Invitación digital diseñada por el becario Sebastián para convocar a los participantes para el Taller de Co-Ideación.	126
Figura 35. Arriba: Señalización de evento en puerta de Auditorio Edificio CONARE. Abajo: Becario Sebastián exponiendo la investigación desarrollada.....	127
Figura 36. Arriba: Infografías diseñadas y facilitadas por el becario Sebastián a partir de datos procesados en conjunto con su tutor Dagoberto. Abajo: Equipo 1 durante sesión de trabajo colaborativo.....	128
Figura 37. Arriba: Lluvia de ideas de un equipo sobre el tema desarrollado de Mobiliario Urbano. Abajo: Equipo 2 durante sesión de trabajo colaborativo.....	129
Figura 38. Participantes del Taller de Co-Ideación.....	130
Figura 39. Propuesta final del Equipo 1 sobre el tema Mobiliario Urbano. Abajo: Propuesta final del Equipo 2 sobre el tema Empaque y Embalaje.	131

4 Código y Título del proyecto

El proyecto de investigación tuvo inicialmente el código 5401-1401-1040, posteriormente se le asignó el centro funcional CF 1401094.

El título oficial del proyecto inscrito en la VIE es el siguiente “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.”

5 Autores y direcciones

Nombre y apellidos	Escuela, Área Académica o Unidad Desconcentrada	Nombramiento (Definido o indefinido)	Condición*	Meses en el proyecto	Tipo de plaza** (VIE, REC, DOC, CONS)
PhD. Dagoberto Arias Aguilar	Forestal	Indefinido	Coordinador Investigador	24	(4) REC
Máster. Juan Carlos Valverde Otárola	Forestal	Definido	Coordinador inicial (Investigador)	2	(8) VIE
Máster. Casia Soto Montoya	Forestal	Definido	Investigadora	24	(4) VIE
Ing. Nelson Zamora Villalobos	Forestal	Definido	Investigador	24	(8) VIE
Ing. María Rodríguez Solís	Forestal	Indefinido 50%	Investigadora	22	(8) VIE
Ing. Arnoldo Ramírez Jiménez*	Física	Definido	Investigador	24	(8) VIE
PhD. Ernesto Montero Zeledón	Física	Indefinido	Investigador	24	(2) VIE
<p>En el 2022 se aprobó una ampliación del proyecto del 01 de enero al 31 de diciembre del 2022, inicialmente sin horas ni presupuesto. Posteriormente se asignaron 4 horas VIE a María Rodríguez y 4 horas VIE a Casia Soto durante el 2022.</p> <p>Estudiantes participantes con actividades de investigación</p> <p>*Realizó su tesis en la maestría Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de la Producción</p> <p>La tesista Arleth Vanessa Porras Granados realizó su tesis en la Maestría de Ciencias Forestales</p> <p>El estudiante Sebastián Sánchez Guzman de la Escuela de Diseño Industrial realizó una investigación con beca CENAT</p>					

6 Resumen

6.1 Resumen en español

El proyecto abordó el problema del alto costo de la instrumentación y la posibilidad de generar soluciones tecnológicas propias. El objetivo fue el diseño y elaboración de un dispositivo de bajo costo y con alta precisión para estudiar atributos fisiológicos y anatómicos de especies arbóreas en el trópico por medio del análisis de datos hiperespectrales. La primera etapa consistió en el diseño de un prototipo de instrumento para obtener la firma hiperespectral de una especie a partir de sus hojas, con una precisión mínima del 93%. 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 un grupo de especies forestales a partir de la información obtenida en la firma hiperespectral. Sobre la aplicabilidad de la solución tecnológica creada, se estudiaron los índices de vegetación obtenidos en campo y las estimaciones mediante VANTs y con imágenes satelitales Sentinel 2 para la predicción de la productividad de plantaciones de teca. (*Tectona grandis*). Por otra parte, se realizó el primer abordaje de las aplicaciones de la biomimética a partir de los resultados del estudio de la fisiología y de las estructuras de las hojas. La conclusión general de este proyecto es que la obtención, procesamiento y análisis de firmas hiperespectrales a partir del desarrollo de sistemas empotrados de bajo costo es factible y 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. Los estudios del uso de la firma hiperespectral mediante la interpretación a través de índices representa una gran oportunidad para aplicaciones en el campo de la nutrición, relaciones hídricas y el estado fisiológico de los árboles y plantaciones.

Palabras clave: reflectancia, firma hiperespectral, dispositivo electrónico, ecofisiología.

6.2 Abstract

The project addressed the problem of the high cost of instrumentation and the possibility of generating proprietary technological solutions. The objective was to design and develop a low-cost, high-precision device to study physiological and anatomical attributes of tree species in the tropics by analyzing hyperspectral data. The first stage consisted of the design of a prototype instrument to obtain the hyperspectral signature of a species from its leaves, with a minimum accuracy of 93%. The second stage was oriented to the construction of a low-cost electronic system to process a photographic image of the diffraction pattern of light on the leaf of a tree. Finally, the third stage was concentrated in choosing an artificial intelligence model that would allow studying eco-physiological characteristics of a group of forest species from the hyperspectral signature. Regarding the applicability of the created technological solution, field vegetation indices and Sentinel 2 satellite images were studied to predict the productivity of teak plantations (*Tectona grandis*). On the other hand, the first approach to biomimetic applications was made based on the results of the study of physiology and leaf structures. The general conclusion of this project is that the acquisition, processing and analysis of hyperspectral signatures from the development of embedded low-cost systems is feasible and represents a powerful tool for the conservation and sustainable development of forest species, as it facilitates researchers, students and professionals in the field of natural resource management the taking of decisions on crop productivity and the sustainability of production. The study of the use of the hyperspectral signature through interpretation through indices represents a great opportunity for applications in the field of nutrition, water relations and the physiological state of trees and plantations.

The second stage was oriented to the construction of a low-cost electronic system to process a photographic image of the diffraction pattern of light on the leaf of a tree. Finally, the third stage focused on choosing an artificial intelligence model to study the ecophysiological characteristics of a group of forest species from the information obtained in the hyperspectral signature. Regarding the applicability of the technological solution created, the vegetation indexes obtained in the field and the estimations by means of UAVs and Sentinel 2 satellite images were studied for the prediction of the productivity of teak (*Tectona grandis*) plantations. On the other hand, the first approach to the applications of biomimetics was made based on the results of the study of the physiology and structures of leaves. The general conclusion of this project is that obtaining, processing and analyzing hyperspectral signatures from the development of low-cost embedded systems is feasible and represents a powerful tool for the conservation and sustainable development of forest species, since it facilitates researchers, students and professionals in the field of natural resource management to make decisions on crop productivity and production sustainability. Studies of the use of hyperspectral signatures through the interpretation of indices represent a great opportunity for applications in the field of nutrition, water relations and the physiological state of trees and plantations.

6.3 Keywords

reflectance; spectral signature; electronic device; ecophysiology

7 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. Aspectos que han incidido que la mayoría de los estudios se han enfocado en aspectos biológicos de rápida evaluación para la domesticación y la conservación (Valle, 2000), que incluyen: caracterización botánica, crecimiento, abundancia, dinámica ecológica (Montero, 2012).

Una cantidad muy reducida de estudios consideran los aspectos ecofisiológicos de las especies (Hu *et al.* 2019), lo anterior por el nivel de complejidad y dependencia de equipos de alto costo (Beerlent *et al.* 2018), en conjunto a que son pocos los investigadores con conocimientos de ecofisiología de las especies tropicales, un aspecto que limita aún más este tipo de estudios. El entendimiento de la fisiología de las especies arbóreas ha tomado relevancia en la última década como mecanismo de entendimiento del cambio de la dinámica de los bosques ante el cambio climático (Guo *et al.* 2018), la caracterización de la capacidad de soportar el estrés hídrico generado por el aumento de los periodos de sequía (Han *et al.* 2019) y el potencial de adaptabilidad de las especies a condiciones nutricionales deficientes en el suelo (López-Valle *et al.* 2017). El estudio a nivel de hoja se convierte en una herramienta fundamental como criterio de identificación de especies (permite entender y cuantificar características únicas de cada especie), para el entendimiento de la multifuncionalidad de los bosques, para comprender la

dinámica de acumulación de carbono, el uso eficiente y la conservación de agua y la producción de alimento para las especies de fauna amenazadas (Nakamura *et al.* 2017).

Lograr la caracterización de aspectos de la fisiología de cada especie, permite crear nuevos criterios para el manejo y conservación de los bosques y su biodiversidad, con el fin de generar el menor impacto posible a los ecosistemas y la sustentabilidad en la obtención de recursos forestales, elementos que contribuyen a ODS Objetivo 13 “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático” y Objetivo 15 “Promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica”, además de sus efectos en la mejoraría de la calidad de vida de los propietarios de bosque y comunidades rurales (Brown 2012). Actualmente las instituciones del gobierno, propietarios y profesionales, no disponen de conocimientos e instrumentos de bajo costo para la adquisición de información básica sobre aspectos fisiológicos que permitan tomar decisiones para el manejo y la conservación (Shi *et al.* 2018). Basta con revisar los libros sobre árboles del trópico, para constatar que consideran mayoritariamente los aspectos botánicos, y no brindan información fisiológica; por lo tanto, existe un vacío de información y poca instrumentación de bajo costo que permita usar la tecnología disponible. El estudio de algunos elementos fisiológicos clave pueden simplificar y aumentar por ejemplo la precisión en la identificación de especies, es conocido que los análisis ópticos como la firma hiperespectral y la fluorescencia de la clorofila han mostrado ser únicas para cada especie (Tero *et al.* 2017), dichas variables combinadas con los análisis colorimétricos y anatómicos permitirían los estudios a escala geoespacial utilizando imágenes de satélite con bandas hiperespectrales, lo cual facilitaría la ubicación y tamaño de las distintas poblaciones de especies arbóreas (Brech *et al.* 2018); o también mejores estimaciones de la biomasa y productividad forestal.

Es una realidad que los instrumentos disponibles representan un costo elevado y limitan su uso, a la vez que generan dependencia a las casas fabricantes que los comercializan, ya que van unidos elevados costos de mantenimiento y además es más frecuente que las nuevas versiones de equipos y software se lanzan al mercado de un años al otro, acortando el tiempo de vida de prestaciones del equipo, haciendo que los equipos queden obsoletos en el corto plazo y la disponibilidad de algunos repuestos sea nula, haciendo necesaria la renovación periódica de los equipos; esto genera un aumento en las inversiones en equipamiento científico tecnológico. El auge de sistemas abiertos (del inglés open source) tanto a nivel de software como hardware, por ejemplo, el desarrollo acelerado de soluciones basadas en Arduino, permite en la actualidad el desarrollo de dispositivos a nivel de prototipado a bajo costo y con una precisión muy similar a equipos comerciales, con nuevas aplicaciones de filtros y métodos matemáticos a nivel de software. Todos estos aspectos del avance de la tecnología potencian la posibilidad de generar equipos compatibles a las condiciones tropicales, con un coste relativamente menor y que sean adaptables a instrumentaciones existentes.

La problemática que justificó la presentación de este proyecto a la VIE-TEC radica en la necesidad del estudio de especies que representan algún grado de riesgo de conservación o son importantes para el manejo productivo y que se pueden ver afectadas por el cambio climático. Por ello, un aspecto fundamental ha sido el desarrollo de dispositivos de medición de variables ecofisiológicas a partir de principios de hiperespectrometría, con el fin de obtener información

fisiológica de las especies con impacto en el comercio y la conservación, con énfasis en especies que no cuentan con estudios concretos para su preservación y manejo sostenible. Actualmente este tipo de estudios de las aplicaciones de la reflectancia a nivel de hoja en Costa Rica es escaso y se ve limitado por el elevado costo de los dispositivos de medición para la adquisición, procesamiento y análisis de datos fisiológicos de forma rápida que faciliten el estudio de especies arbóreas tropicales accesible a los grupos profesionales, ONG's, universidades e instituciones gubernamentales.

8 Objetivos

El proyecto fue aprobado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión según acuerdo del Consejo de Investigación y Extensión en la Sesión Ordinaria No. 14-2019, Ronda 2020, Parte II, Artículo 21.12, del 7 de octubre del 2019 y consideró los siguientes objetivos:

8.1 Objetivo general

Crear un dispositivo de caracterización y análisis de especies arbóreas de bajo costo y con alta precisión por medio de métodos hiperespectrales para estudiar atributos fisiológicos y anatómicos de especies arbóreas en el Trópico.

8.2 Objetivos específicos

OE1. Desarrollar un dispositivo de medición hiperespectral para caracterizar la fisiología y anatomía de especies arbóreas tropicales.

OE2. Procesar las imágenes de las especies para generar datos hiperespectrales y anatómicos de las especies de estudio con alta precisión (93%)

OE 3. Generar modelos de diferenciación fisiológica para manejo y conservación a partir de las caracterizaciones hiperespectrales anatómicas y colorimétricas.

OE 4. Proponer los indicadores fisiológicos a partir las variables analizadas como mecanismo de identificación botánica.

El equipo de investigadores contribuyó en la gestión de recursos externos al monto asignado por la VIE, lo que permitió para el año 2022 que se incluyeran 3 nuevas actividades para reforzar el OE2. Concretamente se logró una beca de posgrado financiada por parte de la Dirección de Posgrados, además una beca obtenida de fondos de becas CENAT y nuevos fondos aportados por el Servicio Forestal de Estados Unidos y transferidos a la FUNDATEC mediante la firma de un convenio El monto total de contrapartida obtenido fue de \$19500 que supera el monto asignado institucionalmente para gastos operativos. En conjunto se adicionaron los siguientes productos al Objetivo Específico 2:

Producto 1: Definición de un método indirecto para la estimación de la productividad y biomasa arriba del suelo en plantaciones de *Tectona grandis* L. (teca), mediante la utilización del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el de diferencia normalizada verde (GNDVI) y ajustado al suelo (SAVI), en un sitio en Guanacaste, Costa Rica. Temas abordados por la Beca de Posgrados.

Producto 2: Análisis de la función de la hoja desde la biomimética a través de los mecanismos y las estrategias estáticas para comprender mejor su interacción con la luz y las futuras aplicaciones en el diseño ecológico. Temas abordados por la Beca CENAT.

Producto 3: Caracterización de un grupo de especies maderables bajo amenaza de extinción por medio visión artificial y el uso del Xylotron (actividades conjuntas con el Servicio Forestal de Estados Unidos). Temas abordados por el Convenio USFS/IP-FUNDATEC.

9 Métodos de investigación utilizados

Sobre los métodos de investigación seleccionados, se utilizó mayoritariamente el método cuantitativo, para la mayoría de los entregables se realizó una intervención de datos cuantificables o numéricos (medibles, escala continua), y se trabajó con universos de datos muy grandes (sobre los cuales tomaron muestras representativas como criterio de validación). Sobre estos datos se aplicaron diferentes métodos de análisis estadístico para ayudar a descubrir patrones y relaciones, así como a realizar generalizaciones y modelos matemáticos. Se utilizó la técnica del análisis de varianza para establecer diferencias estadísticas.

Por otra parte, en el producto 2 se utilizó el método cualitativo y mixto, ya que se buscó el entendimiento de la morfología foliar desde la óptica de la biomimética de las hojas.

10 Marco Teórico

La caracterización de la fisiología de las especies arbóreas ha tomado relevancia en la última década, debido a que los procesos de tecnificación de manejo forestal con fines productivos en conjunto al desarrollo de programas de mejoramiento genético han tomado relevancia para incrementar la productividad de los cultivos maderables, resistencia a ataque de patógenos y periodos de sequía extendidos (Gowen *et al.* 2018). En conjunto con las políticas de conservación y mitigación al Cambio Climático, las evidencias más recientes del aumento de temperaturas, en conjunto con la disminución de la estación lluviosa y cambios globales y en corto tiempo de los patrones de precipitación, inciden directamente en la dinámica de los bosques y mortalidad de especies (Gowen *et al.* 2017), pero no se evidencian estudios a nivel de Costa Rica en especies forestales. Otros estudios en otras regiones por ejemplo los desarrollados por Han *et al.* (2018) indican que la vulnerabilidad a sequía y disminución de tasa de fertilización de especies tropicales inciden directamente en la supervivencia genética de las especies y al crecimiento en bosques tropicales, haciendo necesario el entendimiento de los fenómenos fisiológicos e hidráulicos que afectan su sobrevivencia. Por su parte Guinon *et al.*

(2017) consideran que para los próximos 20 años el entendimiento del comportamiento fisiológico e hidráulico de los árboles, será fundamental para la formulación de programas de conservación genética de especies, proyectos de recuperación de bosques y la determinación de las áreas con mayor vulnerabilidad de afectación por el cambio climático.

Variables como la fotosíntesis, transpiración, movimiento flujo de savia, cavitación, firma espectral y anatomía de la madera toman relevancia en el entendimiento de las respuestas al clima de las especies tropicales, Hughres *et al.* (2016) encontraron para cinco especies tropicales del norte de Colombia, una relación directa entre el crecimiento y capacidad de fotosíntesis, siendo ambas variables los aspectos de mayor rapidez de evaluación en el campo. Por su parte Solano *et al.* (2017) encontraron correlaciones directas de la anatomía de la madera con la capacidad de movimiento de agua y el potencial de resistencia al embolismo, demostrando que las especies con baja densidad de madera y vasos grandes son menos resistentes al embolismo (formación de burbujas de aire en el xilema) en comparación con las especies de densidades altas y vasos de menor diámetro. Mientras Hernandez-Sánchez *et al.* (2016) encontraron que la relación fisiológica de crecimiento y anatomía de la madera (específicamente diámetro y densidad de vasos) de las especies arbóreas en conjunto con su distribución espacial incide directamente en la sobrevivencia de las especies, evidenciando que las especies con una distribución cerrada (poblaciones centradas en una región o área con similitudes ambientales) tiene mayor potencial de afectación al cambio climático en comparación con aquellas especies con amplia distribución espacial y características anatómicas que soportan el embolismo.

De ahí la importancia de entender la anatomía de la madera y ofrecer nuevas formas de lograr la identificación de las especies con un grado de precisión elevado, especialmente en regiones tropicales con una alta diversidad de especies (Frisch *et al.* 2019). De ahí que una variable fisiológica como la firma hiperespectral toma relevancia. Las firmas hiperespectrales son imágenes de datos que tienen varias bandas espectrales de información a través de todo el espectro electromagnético. Generalmente se evalúa entre los 300 y 1100 nm por limitación de algunos equipos que cubren solamente estos rangos, pero permiten determinar en cada punto de la escala nanométrica, la reflectancia de la luz que no es absorbida y que tiende a ser un patrón único y especializado para cada especie (Hu *et al.* 2018). Hugles *et al.* (2018) encontraron que la firma es característica con diferencias en 20 especies tropicales estudiadas en Ecuador y encontraron que el rango de los 540 a 600 nm es el punto de diferenciación de cada especie debido a la presencia del nitrógeno. Por su parte Anberth *et al.* (2018) determinaron para tres especies del género *Eucalyptus* spp. diferenciaciones hiperespectrales entre los 300 y 370 nm y de los 530 a 580 nm, permitiendo diferenciar las especies con imágenes multibanda aéreas, lo cual facilitó la cuantificación y distribución de individuos en el norte de Australia. La potencialidad del uso de la firma espectral es amplia, se puede usar para diferenciar especies y entender el grado de salud, nivel de estrés hídrico o nutricional de las plantas, esto se debe la forma de la curva se rige por los efectos de la absorción de clorofila y otros pigmentos de las hojas. La clorofila absorbe la luz visible eficazmente, pero esta absorbe más fuertemente la longitud de onda del color azul y de color rojo, no tanto así la longitud de onda del color verde, esto produce un pequeño pico de reflectancia en el intervalo de la longitud de onda del color verde. La reflectancia aumenta bruscamente a lo largo de la frontera

entre las longitudes de onda del rojo y cerca al infrarrojo y alcanza valores próximos a 40-50% para la mayoría de las plantas (Grana *et al.* 2019), aspectos se pueden correlacionar con la colorimetría en espacios de color CIELAB o RGB que permitiría a partir de imágenes estandarizadas de las láminas foliares tener una idea del potencial estado nutricional de una especie o su grado de estrés. Es así como se ha desarrollado con cultivos agrícolas en el Norte de Europa (Tero *et al.* 2015) la caracterización fisiológica nutricional que ha permitido encontrar relaciones directas entre la coloración verduzca de las hojas y contenidos potenciales de nitrógeno, potasio y fósforo, elementos que se pueden encontrar a partir de la segunda derivada de la curva de la firma hiperespectral.

En el caso de los estudios de la madera, se han limitado a dendrocronología, análisis de densidad, composición básica y composición química dejando por fuera la relación con factores fisiológicos (Zu *et al.* 2019), pero aspectos como el color de la madera o estructura anatómica permiten no solo diferenciar especies sino también conocer el grado de estrés del organismo en presencia de enfermedades o defectos genéticos que caracterizan a los individuos de baja calidad (Villares *et al.* 2014). La madera ha sido estudiada desde la perspectiva de sus propiedades como material, pero no como indicador de grado de desarrollo del individuo (Beer *et al.* 2028). De ahí que la instrumentación existente sea en su mayoría de laboratorio y sin una capacidad correlativa a la fisiología del árbol. Gerhards *et al.* (2018) mencionan que es necesario disponer de equipos que permitan entender y analizar aspectos macroscópicos y propiedades físicas de la madera que permitan entender el crecimiento, movimiento de nutrientes y procesos de recuperación y sobrevivencia a sequías, factores que permiten seleccionar y mejorar genéticamente a las especies ante objetivos de mejoramiento en función a la resistencia al cambio climático, plagas, entre otros.

Actualmente los equipos disponibles para análisis de colorimetría, hiperespectrometría y anatomía tienen las siguientes particularidades: un valor elevado en el mercado, limitaciones de uso en el campo y adaptabilidad a condiciones y especies del trópico, esto dificulta el desarrollo de análisis fisiológicos completos a las especies arbóreas. Un colorímetro que permita caracterizar coloración en madera y hojas ronda los 4500 dólares en el mercado, un hiperespectroradiómetro oscila desde los 8500 dólares a más de 10000 dólares y un equipo completo para análisis anatómico unos 2000 dólares. Equipos que, a partir de conocimientos en física óptica, en combinación de uso de programas abiertos y plataformas como Arduino y Raspberry pueden ser simplificados a menos de 300 dólares cada uno. Así como se han podido desarrollar sensores climáticos ambientales (Han *et al.* 2018), medidores de turgencia foliar (Gowen *et al.* 2015), sensores de flujo de savia (Tero, 2017) y tensiómetros (Lao *et al.* 2017) con costos inferiores a 200 dólares y una precisión de medición similar a los equipos comerciales. La presente propuesta el considera que en el mercado se pueden encontrar sensores colorimétricos de bajo costo y que se pueden caracterizar con plantillas de medición para la obtención de datos con baja incertidumbre de medición y que se pueden complementar con el uso del microscopio de papel desarrollado por la Universidad de Stanford para generar datos precisos a partir de las muestras foliares y madera. Caso similar con la hiperespectrometría, que con el uso de sensores fotográficos de bajo costo combinado con filtros espectrales se puede generar mediciones puntuales del espectro y generar los valores necesarios para la generación de firmas hiperespectrales equivalentes a los equipos existentes

en la industria y que utilicen el microscopio como punto de referencia de las mediciones. Al igual que los análisis anatómicos que se pueden montar con referencia a los lentes que cuenta el microscopio.

11 Metodología

En la metodología inicial se contempló el uso de un dispositivo de microscopio de papel desarrollado por la Universidad de Stanford. Se trata del Foldscope, también conocido como microscopio Stanford Foldscope <https://foldscope.com/pages/our-story>, es un microscopio de papel de bajo costo y fácil de armar. Fue desarrollado por el Dr. Manu Prakash y su equipo de investigación en la Universidad de Stanford. El objetivo principal del Foldscope es hacer que la ciencia y la exploración microscópica sean más accesibles para personas de todo el mundo, especialmente en áreas donde no hay acceso a equipos de laboratorio tradicionales. Al momento de su implementación en el proyecto se encontraron limitaciones para su uso en investigación. El Foldscope cumple una función didáctica para poblaciones infantiles de edad escolar, de escasos recursos. Después de una búsqueda de equipos de bajo costo se encontraron diversos dispositivos con mayores prestaciones para la investigación especialmente de campo, en este sentido ya existen dispositivos (por ejemplo el microscopio digital con cámara Caima con conexión WiFi, para un costo de \$44 y con aumentos hasta 1000X; también dispositivos como el Microscopio de teléfono con lente CPL/luz LED, microscopio de bolsillo de 200X con clip universal para teléfono compatible con iPhone/teléfono Android, para un costo de \$37. El dispositivo más actual y de uso para aplicaciones forestales es el Xylorix WIDK-24X01 (<https://www.xylorix.com/>) utilizado para la identificación de maderas y que tiene un costo de \$34. El equipo de investigadores optó por continuar con los dispositivos ópticos de bajo costo y fácilmente disponibles incluso en el mercado nacional.

11.1 Metodología contemplada para el primer objetivo específico OE1

Para el uso de un dispositivo para la toma de imágenes espectrales de bajo costo y de uso en el campo se utilizaron los procedimientos que se explicarán a lo largo de esta sección.

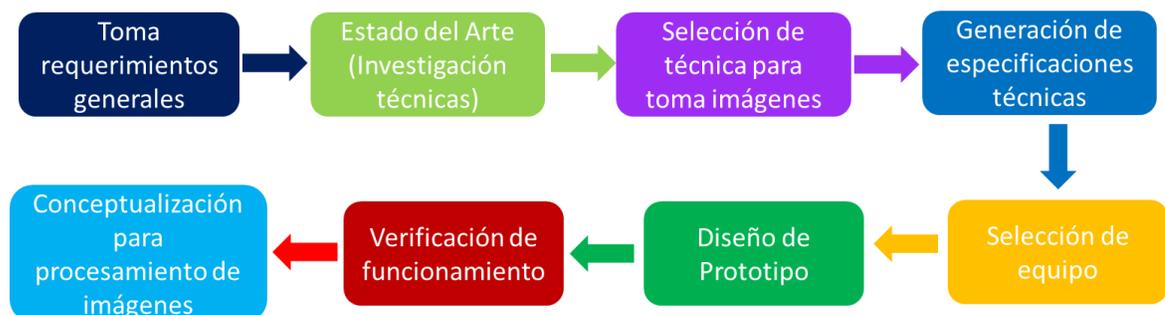


Figura 1. Esquema de proceso ingenieril para abarcar el desarrollo del proyecto.

11.1.1 Requerimientos generales.

Inicialmente se consideró la conceptualización y construcción de un dispositivo novedoso en su facilidad de aplicación, compatible con otras aplicaciones, de un costo accesible y con una facilidad de implementación en condiciones de exteriores. Consideraciones en esta etapa:

- Dimensiones máximas del instrumento.
- Grado de protección IP de la carcasa.
- Dispositivo de muestra de datos.
- Algún requerimiento mínimo de tiempo para su uso en campo.
- Tamaño, posicionamiento, anclaje de la muestra.

11.1.2 Desarrollo prototipo con cámara hiperespectral

Como primer paso para la solución del problema, se establecieron las limitantes y especificaciones que el instrumento debía poseer, específicamente las longitudes del espectro que muestren una mayor relevancia para la investigación, algunos elementos de este y todos los aspectos referentes a la muestra.

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 93%. 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.

11.1.3 Validación del funcionamiento.

Para la verificación del funcionamiento del instrumento se desarrollaron múltiples pruebas de validación, para lo cual se comparó el dispositivo con dispositivos análogos comerciales, además que en el desarrollo y proceso de calibración se implementaron materiales base o de validación con valores conocidos que permitan las modificaciones y adaptaciones del equipo con fin de que las mediciones sean representativas, primeramente se validó funcionalidad de casa sensor independiente, posteriormente de cada sistema (hiperespectral, colorimétrico y anatómico), posterior, a ello la validación de funcionamiento de todo el dispositivo y finalmente un comparativo con los instrumentos comerciales.

11.2 Metodología contemplada para el segundo objetivo específico OE2

11.2.1 Sitios de estudio

Se utilizaron varios sitios de estudio que coinciden con parcelas permanentes establecidas por el ITCR años atrás y que abarcan un gradiente de humedad a lo largo de la costa del Pacífico de Costa Rica, extendiéndose desde Corcovado (perhúmedo) en el sur hasta los bosques semi-húmedos en Guanacaste (Figura 2). Previamente se visitaron las parcelas permanentes instaladas en Estación Experimental Forestal Horizontes en Guanacaste, Miramar y la Cangreja (Puriscal).

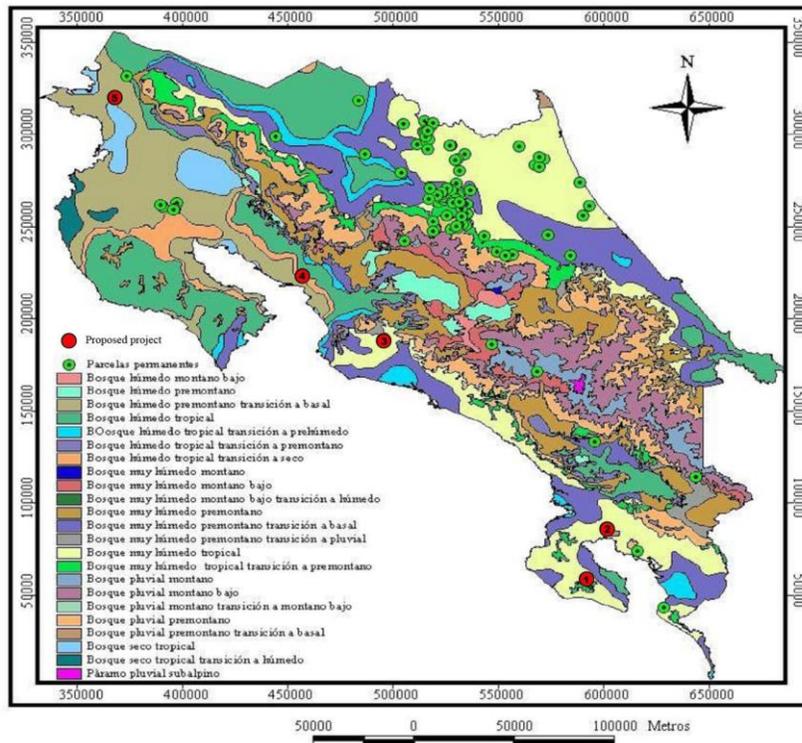


Figura 2. Ubicación de parcelas permanentes para la toma de datos del proyecto.

Estas parcelas fueron seleccionadas a partir de un conjunto más amplio de parcelas permanentes que se establecieron y son supervisadas por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC). Los datos previos de inventario sobre la composición de las especies de árboles están disponibles para el proyecto. Los tres sitios seleccionados se caracterizarán por tener las especies de interés para el estudio. Todas las parcelas están situadas en las tierras bajas <400 metros de altitud, que excluye la variación de la temperatura. La riqueza de especies a nivel de parcela está disminuyendo con el aumento de duración de la estación seca.

11.2.2 Selección de especies

Las especies seleccionadas se caracterizaron por tener una buena representatividad en el ecosistema, con un uso comercial en el mercado nacional o presentar una relevancia se conservación y protección, además de que son especies que se encuentren registradas dentro las parcelas permanentes. El diseño experimental inicial fue un simple aleatorio para determinar la muestra inicial de árboles a coleccionar por especie. Se implementó un procedimiento de árboles juveniles con alturas menores a 20 m para que la colecta de material foliar fuera simple y factible.

11.2.3 Colecta del material foliar

El material foliar se colectó mediante el uso de podadoras extensibles de 20m de longitud máxima y se recogieron muestras de material de la copa que tuviera al menos 25 a 30 hoja, con forma regular, sin presencia de ataque de patógenos o defectos de formación de la lámina. El material fue empacado en bolsas herméticas y posteriormente guardadas en contenedores fríos.

Posteriormente el material se transportó al laboratorio y se seccionaron las hojas lavadas y secadas para posteriormente ser congeladas a -3°C , por experiencias previas se tenía conocimiento de una viabilidad mínima de 96 horas para que cada hoja fuera evaluada por los dispositivos desarrollados y comerciales. En todos los casos se atendieron las mediciones en el menor tiempo posible.

11.2.4 Colecta del material leñoso (madera)

En caso de las muestras de madera se utilizó un protocolo estándar que consiste en la extracción de uno o varios cilindros de madera a una altura de 1 m sobre el nivel del suelo y con dimensiones de 75 mm de longitud y 12,5 mm de diámetro. Su obtención fue mediante una broca de camisa que se coloca en un taladro de batería de 20 V. Cada muestra de madera se registra según un protocolo de colecta y se guarda en una bolsa hermética que contará con una disolución acuosa de alcohol al 30% o en otras ocasiones se le coloca bicarbonato de sodio.

Posterior a esta fase de campo, todo el material fue llevado al laboratorio de ECOPLANT y cada cilindro fue convertido en cinco cubos de 10 mm de cara, los cuales fueron procesados con un micrómetro rotativo, posteriormente el material se secó por 72 horas a una temperatura de 105°C para que adquieran la condición seca.

11.2.5 Medición de firma hiperespectral con equipos comerciales

Cada hoja y muestra de madera se le obtuvo la firma hiperespectral tanto con el dispositivo desarrollado como por dos equipos comerciales diferentes según el estudio específico, esto con fin de continuar analizando la calibración y precisión de los instrumentos. En caso de las hojas, la firma se midió en cinco puntos distintos, en cambio en la madera se midió en la cara radial, transversal y longitudinal más lisa de cada cubo. En otros casos solo en el corte transversal.

Los instrumentos comerciales que se utilizaron fueron los siguientes: hiperespectrómetro modelo UNISPEC SC de PP System que trabaja con un rango de 310 a 1130 nm y una resolución mínima de cada 25 nm. También se utilizó el hiperespectroradiómetro HandHeld 2 de la marca ASD con un rango espectral 325 – 1075 nm. El área de medición espectral fue de 2,5mm con un cierre total, lo cual evita errores por parte del equipo, el tiempo medición del equipo es de 2,5 segundos por medición. También se realizaron mediciones con un espectrofotómetro UV-Vis, modelo Thermo Evolution 220, marca Thermo Scientific, que es un espectrofotómetro más robusto que permite medir reflectancias y transmitancias. Este último equipo fue facilitado por el laboratorio de óptica de la Escuela de Física. En cuanto a las reflectancias se procedió a medir la reflectancia total, la reflectancia especular y la

reflectancia difusa con gran precisión.

Posteriormente se analizó y comparó las firmas generadas por cada instrumento, durante el proceso se mantuvieron constantes los puntos de medición de cada muestra, además de un control de factores ambientales como temperatura, humedad relativa y luminosidad.

11.2.6 Medición colorimétrica con equipos comerciales

La medición colorimétrica empleó al menos dos instrumentos: un colorímetro portable tipo NIX Pro y un colorímetro HUNTER LAB. Las mediciones se realizaron en hojas con tres determinaciones por cada lámina en el haz en el mismo punto de referencia de las firmas hiperspectrales y en caso de la madera se realizó en las tres caras representativas de cada cubo y de la misma manera para la adquisición de las firmas.

La medición del color del primer equipo comercial consistirá en un espectrofotómetro NIX Pro de cromatografía CIE estandarizado. El color se determinó entre el rango de los 400 a 700 nm con un puerto de medición de 10 mm de diámetro. Para la observación de la reflexión del componente especular (SCI modo) se incluyó en un ángulo de 10, que es normal para la superficie de hojas (D65 / 10); y con un D65 (correspondiente a la luz del día en 6500 K). El segundo dispositivo Hunter LAB estandarizado por la CIE con un punto de observación de reflexión del componente especular (SCI modo) se incluyó en un ángulo de 10, que es normal para la superficie de hojas (D65 / 10); y con un D65 (correspondiente a la luz del día en 6500 K).

El color se evaluó con el sistema CIELAB, el cual generó tres parámetros para explicar el color que consistieron en: L* (luminosidad), a* (tendencia de color de rojo a verde) y b* (tendencia de color de amarillo a azul). Además, se determinó el diferencial de color (ΔE^*) que se definió como la variación neta del color entre dos escenarios, según lo establecido por la norma ASTM D 2244 (2013) cuya fórmula es detallada en la ecuación 1. Se utilizó para comparar la variación del color obtenida entre los dos sistemas de medición de color.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

Donde: ΔE^* es el diferencial del color; ΔL^* es L* del protocolo de fotografía analizado - L* muestra física; Δa^* es a* del protocolo de fotografía analizado - a* muestra física; Δb^* es b* del protocolo de fotografía analizado - b* muestra física.

Evaluación de imágenes macroscópicas de análisis de madera

La caracterización anatómica se llevó a cabo con un sistema de fotografía macroscópico con un estereoscopio a un aumento de 20X, en caso sistema tradicional, se implementó en las mismas caras otros análisis como las firmas. Las fotografías se tomaron con una luz fría con intensidad al 80% y calidez de 4200 K. Se utilizó el formato JPG con máxima resolución (5MP), las imágenes analizaron con el programa Image J, con el que se determinó la cantidad de vasos por área, diámetro de vasos, longitud de vasos.

11.2.7 Análisis de resultados

Se desarrolló para cada caso, un análisis de varianza ANOVA para cada especie para evaluar la relación entre equipos y definir si el dispositivo desarrollado generó información sesgada con respecto los equipos comerciales, para lo cual se realizaron comparaciones en cada

especie utilizando programaciones de análisis múltiple ANOVA disponibles en el programa R que permitió desarrollar un “script” de análisis base para simplificar el proceso. Los análisis consideraron una significancia tanto de 0,05 y de 0,01 debido a necesidad de precisión de las mediciones por parte del nuevo dispositivo.

11.3 Metodología contemplada para el tercer objetivo específico OE3.

Con la información generada se trabajó en el desarrollo de modelos de diferenciación y clasificación de especies acorde a la información disponible. Los modelos inicialmente se desarrollaron en Phyton y fueron analizados con la plataforma R.

Todos los parámetros del modelo se aproximaron con frecuencias relativas del conjunto de entrenamiento. Estas son las estimaciones de máxima verosimilitud de las probabilidades. Una clase priori se puede calcular asumiendo clases equiprobables (es decir, $priori = 1 / (\text{número de clases})$), o mediante el cálculo de una estimación de la probabilidad de clase del conjunto de entrenamiento (es decir, $(\text{el priori de una clase dada}) = (\text{número de muestras en la clase}) / (\text{número total de muestras})$). Para la estimación de los parámetros de la distribución de una característica, se asumió una distribución o se generaron modelos de estadística no paramétrica de las características del conjunto de entrenamiento.

Las hipótesis sobre las distribuciones de características son llamadas el modelo de eventos del Clasificador Bayesiano Ingenuo. La distribución multinomial y la distribución de Bernoulli son populares para características discretas como las encontradas en la clasificación de documentos (incluyendo el filtrado de spam). Estas hipótesis conducen a dos modelos distintos, que a menudo se confunden. Cuando se trata con los datos continuos, una hipótesis típica es que los valores continuos asociados con cada clase se distribuyen según una Distribución normal.

El teorema permite hacer una agrupación de tipo histograma de las características de cada firma permitiendo como primer elemento clasificatorio el desarrollo de una redivisión de las áreas de firma variante entre especie, agrupando las especie o géneros que tengan mayor similitud, para posteriormente desarrollar un análisis de discriminante lineal (LDA) para interpretar y diferenciar linealmente las variaciones dentro de las especies con un grado significativo de relación a valores puntales de las firmas hiperespectrales, variaciones colorimétricas.

En caso de las imágenes anatómicas se realizó con un análisis bayesiano FMRI, porque los datos se describen de manera jerárquica en un modelo vóxel incorporado al modelo del objeto. Los modelos espacio-temporales describen los datos FMRI y susceptibles de un análisis Bayesiano. Además, los enfoques estadísticos incorporan a la función base la información anatómica incluso en el contexto no Bayesiano. Las hipótesis frecuentistas no son fáciles de interpretar. Mientras que la probabilidad de los efectos umbrales son una medida intuitiva permitiendo hacer comparación macroscópica de imágenes de distintas especies o dentro de las especies, capturando el potencial error de generación de los modelos.

La distribución del método Bayesiano permitió obtener parámetros manipulables, a lo cual se le aplicó un enfoque Genovese para aumentar la capacidad de asimilación y corrección de los modelos. Los métodos Bayesianos se utilizan para probar la linealidad de la respuesta hemodinámica. En comparación con el modelo HRF, el enfoque Genovese es más flexible y permite que las funciones no alcancen el post-estímulo presente en algunos vóxeles. Este modelo procesa los datos de un individuo en solo unas horas, pero introduce una componente

de ruido de la imagen. El proceso de ruido se descompone en dos partes: 1) No estacionaria determinista. Elimina el ruido a través de un filtro de paso y no se considera en el modelo y 2) Estacionarios de corta variación en la escala estocástica. Elimina el ruido como una normal multivariante, con media cero y matriz de varianza-covarianza Σ ; con ello se puede aumentar el grado de identificación y clasificación de imágenes.

Aparte se desarrolló una rutina de programación en Python que luego se implementó en la plataforma R para determinación estructural de la anatomía de la madera (Densidad de vasos, diámetro de vasos, concentricidad, profundidad y dimensionalidad de parénquima).

Posteriormente con uso de Machine learning se desarrolló un algoritmo de clasificación de especies de tipo supervisado ya que el algoritmo produce una función que establece una correspondencia entre las entradas y las salidas deseadas del sistema. Un ejemplo de este tipo de algoritmo es el problema de clasificación, donde el sistema de aprendizaje trata de etiquetar (clasificar) una serie de vectores utilizando una entre varias categorías (clases). La base de conocimiento del sistema está formada por ejemplos de etiquetados anteriores.

11.4 Metodología contemplada para el cuarto objetivo específico

A partir de los resultados obtenidos de los objetivos específicos 1, 2 y 3 en conjunto con reuniones y consultas a los colaboradores externos, buscó definir el efecto que podría aportar los resultados del proyecto en los sistemas actuales de identificación de especies y las políticas actuales de manejo y conservación de recurso forestal (como los potenciales resultados de la continuación del proyecto incidiría en el sistema de manejo y conservación de bosques, especialmente en la identificación automática con el XyloTron), para ello se realizó un análisis estratégico en el que se evaluaron fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) actuales y del potencial impacto del proyecto y la definición de las especies más críticas para la identificación automática considerando aspecto de tala y trasiego ilegal de madera.

Posteriormente se definió una nueva propuesta de proyecto de investigación que incide en la usabilidad científica e impacto social de la instrumentación desarrollada y de la información potencialmente generable, que sea de consideración para el manejo y conservación de los recursos forestales, para lo cual se desarrolló un taller de instrumentación en el que se invitó a profesionales, miembros de organizaciones no gubernamentales, miembros de instituciones estatales académicos en los que se presentó el dispositivo desarrollado, método de uso y la propuesta de impacto de información para desarrollo criterios fisiológicos como elemento de conservación de recurso forestal. Posterior a ello se abrió un espacio para retroalimentación, mejora de la propuesta para posteriormente someterla a consideración de la VIE

11.5 Metodología para las nuevas actividades a desarrollar dentro del OE2.

11.5.1 Producto 1: Estimación de índices de vegetación y predicción de biomasa en plantaciones

La información sobre productividad y biomasa de plantaciones forestales es de suma importancia para los actores del sector forestal tanto a nivel nacional como a nivel internacional, y muy particularmente interesa el uso de nuevas tecnologías para hacer eficiente

y precisa la toma de la información básica. Ambos aspectos de una plantación pueden ser estudiados mediante métodos directos e indirectos, la utilización de los métodos disponibles depende en su mayoría del conocimiento técnico, práctico y de los recursos económicos de los interesados. Por otra parte, en un contexto más global, los países con tradición de producción de madera, han automatizado sus procesos de producción y algunos otros se dirigen hacia la automatización en la toma de información con equipos especializados que incluyen sensores, cámaras, drones e imágenes satelitales que en su conjunto ofrecen gran potencial en el trópico.

11.5.2 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en una de las fincas de la empresa Panamerican Woods, ubicadas en el cantón de Nandayure en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, en las coordenadas geográficas 85°24'29" Oeste y 9°85'70" Norte. Donde la temperatura promedio anual oscila entre los 25-36 °C, con precipitaciones anuales promedio de 2299 mm y una elevación de 11 msnm. El área de la finca se encuentra cubierta en su mayoría por una plantación forestal de *Tectona grandis* L., con un área aproximada de 214,32 hectáreas, con árboles de 11 años de edad establecidos a un distanciamiento inicial de 3x3 metros.

11.5.3 Diseño experimental

El experimento se analizó bajo un diseño de bloques completos al azar, en donde se contó con un total de 30 parcelas (unidades muestrales), analizadas bajo cuatro tipos de tratamientos experimentales, que consistieron en diferentes procesamientos de las imágenes satelitales utilizadas en el estudio (cuadro 1). Cada parcela tuvo un tamaño de 60 x 60 metros, con un total aproximado de 400 árboles por parcela.

Cuadro 1. Tratamientos aplicados en el estudio

Tratamiento	Código	Detalles
1	T1	Corrección atmosférica
2	T2	Corrección atmosférica más ortorectificación con modelo de elevación
3	T3	Corrección atmosférica más transformación de los datos de reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) a reflectancia a nivel de la superficie (BOA)
4*	T4	La imagen se procesó tal cual se descargó

*Tratamiento testigo

11.5.4 Datos de campo

Variable dasométrica: Los datos fueron tomados en el mes de agosto de 2021, donde se registró la variable dasométrica de diámetro a la altura de pecho (dap a 1,3 metros). Para esto

se midieron 50 árboles por parcela; los cuales, se seleccionaron siguiendo un patrón en zigzag y midiendo un árbol cada ocho individuos a lo largo de toda la parcela.

Respuesta espectral: También conocida como firma espectral; para la cual, se seleccionaron los cinco árboles más representativos de cada parcela. Para dichas mediciones utilizó el espectroradiómetro del TEC, para la utilización del mismo se seleccionaron diez hojas por árbol mediante el uso de las podadoras de extensión y una plataforma para el ascenso de personas hasta la altura requerida. Se aseguró que estas hojas no presentaran decoloración, 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 recolectaron de la porción distal o media de la rama. Siempre que fue posible, las hojas fueron medidas inmediatamente al ser cortadas; y en los casos en los cuales esto no fue posible, las hojas fueron cortadas y colocadas entre toallas de papel humedecidas con agua destilada estéril, y se guardaron en bolsas de plástico herméticas debidamente rotuladas, evitando su exposición al sol y se colocaron en una hielera para ser llevadas al sitio más cercano para su respectiva medición.

11.5.5 Obtención de imágenes

1. Satelitales: fueron descargadas directamente desde la página web de Copernicus, dichas imágenes son de acceso gratuito y se obtuvieron para el mes de las mediciones (mes de junio), momento en que se realizaron las mediciones de campo.

2. Multiespectrales: Se logró obtener mediante la utilización de la cámara multiespectral con la que cuenta el laboratorio de PRIAS; la cual, se vinculó al dron perteneciente al mismo laboratorio. Las fotografías obtenidas con dicha cámara se tomaron con los protocolos establecidos por el personal del PRIAS, siguiendo las instrucciones del mismo.

En ambos casos las imágenes fueron obtenidas el mismo día, en el mes de junio con la finalidad de disminuir el error experimental. El procesamiento realizado a las imágenes multiespectrales obtenidas con el dron del laboratorio de PRIAS, fue de igual manera el recomendado por los funcionarios del laboratorio.

Los aspectos relacionados sobre el programa de vuelo se realizaron bajo la asesoría del personal del PRIAS.

11.5.6 Procesamiento de datos

Mediante modelos alométricos construidos por la empresa Panamerican Woods, se estimó la biomasa aérea en toneladas por hectárea usando el diámetro a la altura del pecho (dap a 1,3 metros) como variable independiente. Y de la misma manera se estimó el volumen, sin embargo; en esta ocasión se utilizó un modelo alométrico reportado para la especie por Fallas (2017) (ecuación 1).

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

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

Cada imagen satelital para utilizar fue procesada mediante el software QGis v. 3.14, para obtener los resultados esperados de acuerdo a cada tratamiento presentado en el cuadro 1.

11.5.7 Cálculo de índices espectrales

Los índices vegetales utilizados para el presente estudio fueron calculados tanto con imágenes satelitales Sentinel-2 como con las fotografías obtenidas con la cámara multispectral y los datos recolectados en campo mediante el espectroradiómetro. Dichos índices consideraron 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) y su forma de ser calculados se pueden observar en el cuadro 2.

Cuadro 2. Índices en el estudio. R: Reflectancia; NIR: banda de infrarrojo; r: banda roja; v: banda verde; L: constante (0,5 en este caso).

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)

11.5.8 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianzas (ANOVA) en donde se determinó el efecto de los tratamientos sobre las variables respuesta. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilks) y de homocedasticidad de varianzas (prueba de Levene). También se realizaron pruebas de comparación de medias mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$; con el fin de determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. Estos análisis se realizaron mediante la utilización del software estadístico Infostat, Minitab y rutinas en R Studio.

Además, se realizaron y validaron modelos para determinar el volumen y la biomasa presente en plantaciones forestales, a partir de índices de vegetación mediante la técnica de análisis de regresión; los cuales, explican la relación existente entre los índices de vegetación, el volumen y la biomasa arriba del suelo. Dichos modelos fueron realizados con un nivel de exactitud del 90%.

Para la obtención de estos modelos se realizaron los siguientes pasos:

1. Se definió el objetivo del modelo a construir y la variable que se desea estimar y las variables independientes a usar.
2. Se midieron las dimensiones básicas de la muestra. La muestra fue homogenizada, para que así representen al grupo específico de individuos de la especie.
3. Se plotearon los datos para encontrar y corregir errores, identificar outliers y proponer modelos alternativos.
4. Se separó un 15% de los datos para validación.
5. Se corrió un análisis de regresión de cada modelo propuesto y se calcularon sus estadísticos de precisión.
6. Se escogió el mejor modelo, de acuerdo con sus estadísticos.
7. Se validó y comprobó la exactitud del modelo desarrollado.
8. Se publicó y presentó el modelo desarrollado con la información necesaria para su adecuado uso y entendimiento de los futuros usuarios.

11.6 Metodología para las nuevas actividades a desarrollar para el Producto 2: Estudios de biomimética

Este nuevo producto de investigación buscó profundizar en el entendimiento de los rasgos biomiméticos de las hojas para entender su rol en la asimilación y respuesta a la luz, que su vez ayuden al uso de la firma radiométrica e hiperspectral como indicadores de desarrollo fisiológico, enfermedades y estado nutricional. Es conocido que a través de las firmas espectrales específicas de los cultivos y se pueden desarrollar sistemas automatizados con drones que permitan el monitoreo no destructivo de áreas cultivadas, creando una mayor precisión en el manejo de cultivos, prevenir e identificar áreas con deficiencias de desarrollo o potencial presencia de patógenos. En los bosques son herramientas que ayudan en el inventario y monitoreo de las especies, estimaciones de productividad y balances de carbono, que ayudan a los ajustes de las estrategias de conservación y adaptación al cambio climático. Para ello resulta indispensable continuar midiendo firmas de especies, generando base de datos para la biblioteca de firmas espectrales y demostrar que a partir de las firmas se pueden realizar novedosos estudios con aplicaciones en otros campos. Por ello en este estudio analizó la función de la hoja desde la biomimética y su naturaleza envolvente, a través de los mecánicos y las estrategias estáticas para comprender mejor su interacción con la luz y las futuras aplicaciones en el diseño ecológico.

11.6.1 Sitio de estudio

Las actividades se desarrollaron en varios sitios de Costa Rica, según los objetivos del proyecto de instrumentación vigente. Básicamente se realizaron colectas en parcelas permanentes en Horizontes, Guanacaste, Hacienda el Rodeo en Ciudad Colón, Arboreto del

parque metropolitano La Sabana, Estación Biológica La Selva. Los permisos de colecta ante el SINAC estuvieron a nombre del Ing. Nelson Zamora V.

11.6.2 Evaluación radiométrica

Se continuó con la adquisición de un conjunto de firmas de reflectancia espectral, denominado librería espectral, que caracterizan la respuesta de un tipo de material o superficie. Estas medidas se realizaron con la ayuda del espectroradiómetro disponible en el Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT), modelo Field Spec Hand Held 2 de la marca ASD®, el cual captura longitudes de onda desde los 325 nm hasta los 1075 nm. El espectroradiómetro fue ajustado con una fuente interna de luz, con el fin de garantizar una constancia lumínica y excluir la luz del ambiente. Las mediciones se efectuaron en al menos 5 muestras foliares de cada árbol por especie seleccionada para el estudio (para este objetivo se considerarán 10 especies).

La información generada con el espectroradiómetro fue procesada a través de índices de manera similar al uso de los índices de vegetación. Por ejemplo, un índice de vegetación ampliamente utilizado en las aplicaciones de la técnica de sensores remotos es el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) el cual se obtiene de la relación entre la banda del infrarrojo y la banda del rojo del espectro electromagnético, su definición es

11.6.3 Medición de la concentración de nutricional foliar

Al menos 5 muestras de material foliar de las 10 especies de estudio se pulverizaron en un molino disponible en los laboratorios del Centro de Innovación Forestal del TEC y una muestra compuesta fue enviada a laboratorio del INTA para el análisis completo de nutrientes en los tejidos. Otras muestras de hojas de estas especies fueron liofilizadas en el liofilizador del CIB-Biología y se realizaron los análisis de pigmentos fotosintéticos.

11.6.4 Evaluación colorimétrica

El color se evaluó con un espectrofotómetro NIX Pro de cromatografía CIE estandarizado. El color se determinó entre el rango de los 400 a 700 nm con un puerto de medición de 10 mm de diámetro. Para la observación de la reflexión del componente especular (SCI modo) se incluyó un ángulo de 10, que es normal para la superficie de hojas (D65 / 10); y con un D65 (correspondiente a la luz del día en 6500 K), en cada muestra se midió el color en todas las hojas presentes en la muestra y se analizó tanto en el haz como envés, en cada hoja se recolectaron tres mediciones. El color se evaluó en formato CIELAB, el cual genera tres parámetros para explicar el color que consistieron en: L* (luminosidad), a* (tendencia de color de rojo a verde) y b* (tendencia de color de amarillo a azul).

11.6.5 Otras características de las hojas

Área foliar específica: la totalidad de hojas colectadas de cada planta se escanearon y analizaron en el programa ImageJ, implementando el sistema de caracterización de píxeles para determinar el área foliar específica promedio de cada árbol.

El ángulo de inserción de la hoja se midió con el instrumento más común para medir los ángulos de inserción en hojas. Se trata del compás prolongado, descrito por Winter y Ohlrogge (1973), el cual consta de una regla transportador, una brújula y una plomada.

11.6.6 Estrategias estáticas y mecanismos dinámicos de las hojas

En las figuras 1, 2 y 3 se presenta la propuesta de estrategias estáticas y mecanismos dinámicos que se emplearon en este apartado.



Figura 3. Detalle de los mecanismos dinámicos a nivel de hojas implementados en el estudio.

Estrategias Estáticas			
Parámetro Ambiental	Función	Escala	Estrategia Biológica
Luz	Regular cantidad luz	Macroscópica	Hojas de sol más gruesas y nerviadas; hojas de sombra delgadas y anchas (dimorfismo foliar en altura)
		Microscópica	Hojas de sol con aumento densidad estomática (dimorfismo foliar en altura)
	Ganar energía luminosa	Macroscópica	Colores oscuros para absorber radiación solar
		Microscópica	
	Protegerse de la luz	Macroscópica	
		Microscópica	Superficie cerosa para reflejar radiación ultravioleta
Dióxido de Carbono	Captar dióxido de carbono	Macroscópica	
		Microscópica	

Figura 4. Detalle de las estrategias estáticas a nivel de hojas empleadas en el estudio

Estrategias Estáticas			
Parámetro Ambiental	Función	Escala	Estrategia Biológica
Temperatura	Conservar calor (en los meses fríos)	Macroscópica	Hojas perennes de tamaño reducido
			Crecimiento de parte rastrera
			Hojas perennes aciculares
	Ganar temperatura (meses cálidos)	Macroscópica	Hojas perennes de colores oscuros
		Microscópica	
		Microscópica	
Disipar calor	Macroscópica	Hojas grandes que permiten enfriamiento por pérdida de calor latente (mediante la evaporación de agua)	
	Microscópica		
Temperatura	Intercambiar humedad con el ambiente	Macroscópica	
		Microscópica	Hojas con mayor densidad estomática en el envés para una mayor transpiración
	Generar agua	Macroscópica	Hojas anchas que interceptan parte del agua de lluvia
		Microscópica	
	Conservar agua	Macroscópica	Hojas suculentas como sistema de almacenamiento de agua
		Macroscópica	Hojas perennes aciculares para reducir las pérdidas de agua por transpiración
			Hojas coriáceas para disminuir la permeabilidad
			Ceras para disminuir la permeabilidad
		Microscópica	Reducción número estomas para disminuir la permeabilidad
		Microscópica	Estomas protegidos para reducir las pérdidas de agua por transpiración

Figura 5. Detalle de las estrategias a nivel de hojas empleadas en el presente estudio.

11.7 Metodología para las nuevas actividades a desarrollar para el Producto 3: Identificación automática de maderas tropicales

Con este nuevo producto de investigación se buscó continuar la cooperación con los gobiernos de los países del DR-CAFTA para combatir la tala ilegal de las especies del género *Dalbergia* sp., *Cedrela* sp. y la especie *Dipteryx panamensis* y promover el manejo sostenible de sus bosques.

Se buscó generar la información suficiente para la identificación forense de la madera extraída ilegalmente, particularmente a través del desarrollo y la implementación de un dispositivo microscópico de identificación de especies maderables conocido como Visión Artificial (XyloTron). Este dispositivo utiliza tecnología de reconocimiento facial para comparar imágenes microscópicas de una muestra de madera determinada, y la compara con una base de datos de imágenes de referencia existentes de la misma especie. El dispositivo se está utilizando en los laboratorios de maderas de la región, y se está completando la capacitación de los funcionarios encargados del cumplimiento la ley en el campo y en aduana. A través de este proyecto, el TEC recibió en calidad de donación un XyloTron.

Básicamente el trabajo en este apartado consistió en la identificación de individuos maduros de las especies del género *Dalbergia* sp., *Cedrela* sp. y la especie *Dipteryx panamensis* (trabajo de campo muy intensivo en giras). Se localizarán al menos 10 individuos en las siguientes zonas: Talamanca, Valle Central, y Pacifico Central. A cada individuo se le realizó la colecta de información, muestras botánicas y muestras de madera.

La metodología detallada de preparación de las muestras ya había sido estandarizada por organizaciones e instituciones de Estados Unidos. El detalle de la metodología puede ser consultada en el siguiente enlace: https://tecnube1-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/darias_itcr_ac_cr/EV9EBp6Zg9VEhMxlAmTi-8UBe5cVEqyDIBFv36buSr98GQ?e=r78oP1

En esta primera etapa las muestras fueron enviadas al Royal Botanic Gardens, Kew. En el 2022 con la implementación del uso del instrumento Xylotron donado al TEC se procesaron diversas muestras de madera para obtener las imágenes anatómicas y se inició con el entrenamiento del algoritmo automático de reconocimiento de maderas y paralelamente se trabajó con el análisis de la firma espectral de maderas. La experiencia generada permitió trabajar en una nueva propuesta de proyecto de investigación que fue aprobada por la VIE.

12 Resultados

12.1 OE1. Desarrollar un dispositivo de medición hiperspectral para caracterizar la fisiología y anatomía de especies arbóreas tropicales.

Este objetivo fue cumplido al 100% mediante dos trabajos de graduación (TFG) y una tesis de maestría, con el correspondiente artículo científico publicado en la revista Tecnología en Marcha.

El primer trabajo fue de licenciatura elaborado por el estudiante Oscar Ortega de la carrera de licenciatura en Mecatrónica y tuvo como nombre *“Diseño de un instrumento hiperspectral para la caracterización de especies arbóreas mediante sus hojas, a partir de técnicas ópticas desde una perspectiva mecatrónica”*

El segundo trabajo desarrollado fue una tesis elaborada por el Ing. Arnoldo Ramírez dentro del programa Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de la Producción y que llevó el nombre *“Sistema de visión hiperspectral para el estudio de especies arbóreas tropicales”*

El tercer trabajo de graduación de licenciatura fue elaborado por la estudiante Paulina Méndez Fallas de la carrera de Mecatrónica y tuvo como nombre *“Automatización de un sistema de visión hiperspectral para hojas de especies forestales”*

12.1.1 Diseño de un dispositivo inicial basado en una cámara (TFG Oscar Ortega de Mecatrónica)

12.1.1.1 Sistema mecánico de la cámara

Para este subsistema se realizó una simulación de elementos finitos mediante SolidWorks (figura 6) para determinar los esfuerzos en el tornillo T8 de rosca ACME y su respectiva rosca, se utilizaron estos dos elementos del ensamble del actuador lineal ya que se consideraron como los más críticos al recibir más desgaste y carga torsional, se utilizó un torque de 48 Ncm por el valor de torque máximo que soporta el motor. Los resultados se muestran en la figura 7 para el tornillo con un factor de seguridad de 3.8 y en la figura 8 para la tuerca con un factor de seguridad de 73.0.

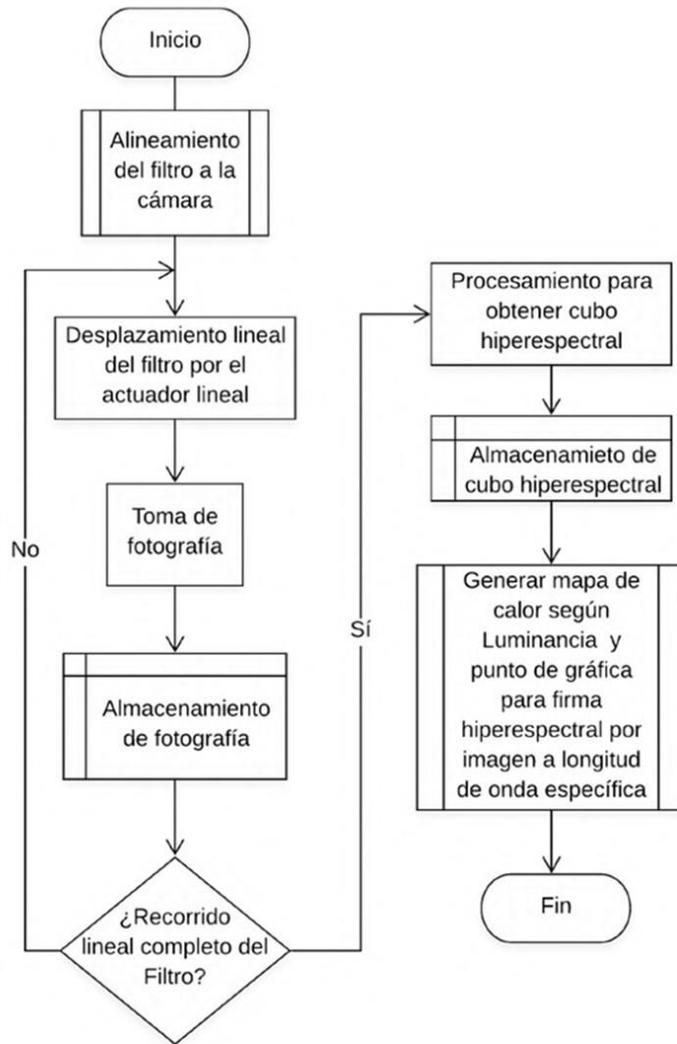


Figura 6. Diagrama de flujo de concepto de diseño para el instrumento hiperspectral. Elaborado por Oscar Ortega.

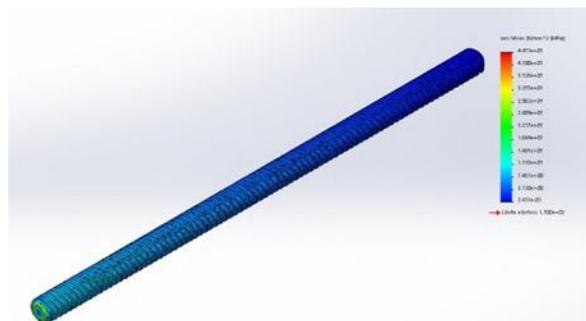


Figura 7. Esfuerzo de VonMises para tornillo en torsión pura. Elaborado por Oscar Ortega.

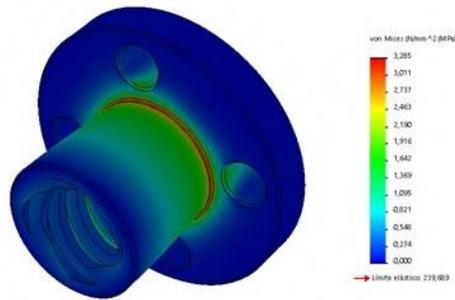
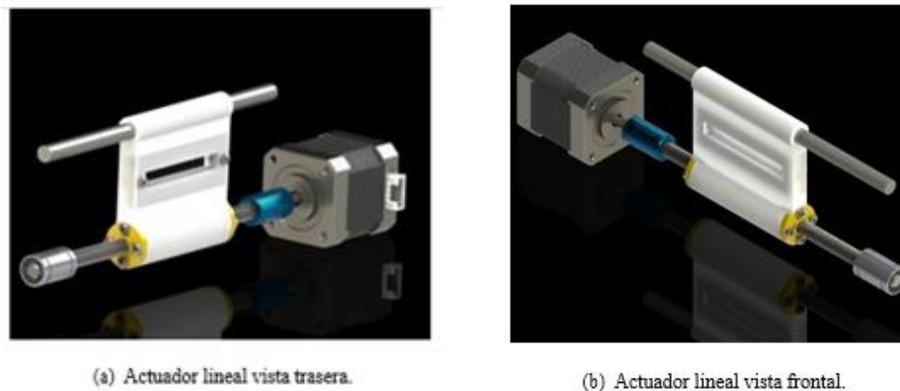


Figura 8. Esfuerzo de VonMises para tuerca en torsión pura. Elaborado por Oscar Ortega

Se validó el del funcionamiento del actuador lineal mecánico (figura 9) mediante un análisis de movimiento en SolidWorks donde se especificaron todas las restricciones y uniones mecánicas del ensamble, además de modelar el motor según los datos del fabricante. Se obtuvieron los resultados del desplazamiento angular constante, el desplazamiento según el funcionamiento a control para desplazar el FLV BA, hasta encontrar la precisión del subsistema mecánico y aproximar el tiempo que tardaría en generar un cubo hiperespectral.



(a) Actuador lineal vista trasera.

(b) Actuador lineal vista frontal.

Figura 9. Detalles del actuador lineal.

12.1.1.2 *Procesamiento de imágenes con el dispositivo*

Para la toma de fotografías se estandarizaron los parámetros de la cámara, como se muestra en la muestra en el cuadro 3, con un tiempo máximo de 4.241512s entre todas las muestras para la toma y almacenamiento de una fotografía según el tiempo de ejecución indicado por el microprocesador. El ensamblado para la toma de fotografías se muestra en la figura 10 y el resultado del procesamiento de imágenes para obtener el mapa de calor de luminancia (reflectancia) se muestra en la figura 11.

Cuadro 3. Parametrización de la cámara

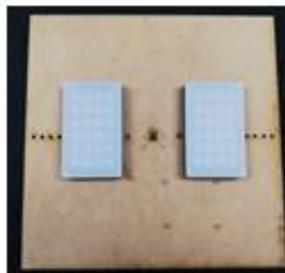
Parámetro	Valor
ISO	100
resolución	1027x768 píxeles
Formato	.png
Tipo de datos de imagen	uint8
Tiempo obturación	32243 μ s
Ganancia Analógica	331/128
Ganancia Digital	257/256



(a) Estructura ensamblada.



(b) Estructura aislada de luz exterior.



(c) Luces y cámara.



(d) Zona de muestreo.



Figura 10. Detalles de ensamblado de la cámara en el laboratorio ECOPLANT

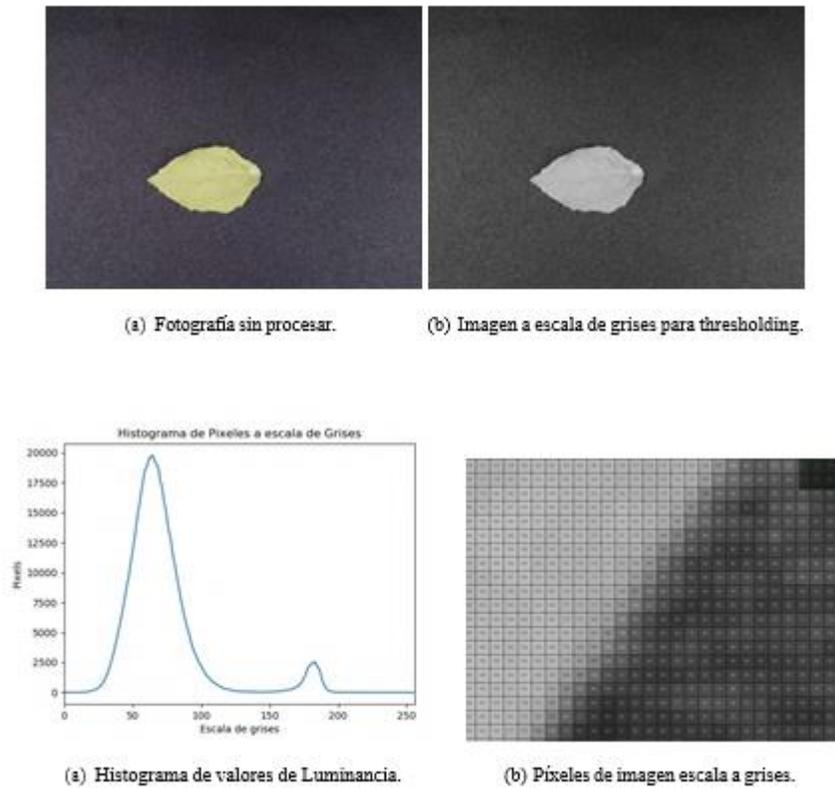


Figura 11. Resultado del procesamiento de imágenes de hojas y curva de reflectancia

12.1.2 Desarrollo del sistema de visión hiperspectral para el estudio de especies arbóreas tropicales (tesis del Ing. Arnoldo Ramírez)

El investigador Ing. Arnoldo Ramírez estuvo a cargo del desarrollo del dispositivo de bajo costo denominado SpectraTEC y el trabajo fue complementado con una tesis de la maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de la Producción. Los resultados fueron presentados en el V Encuentro Bienal Centroamericano y del Caribe de Investigación y Posgrado y resumidos en un artículo publicado en la revista Tecnología en Marcha, cuya cita es la siguiente:

Ramírez-Jiménez, A., Arias-Aguilar, D., Valverde-Otárola, J.C., Zamora-Villalobos, N., Rodríguez-Solís, M., & Montero-Zeledón, E. (2022). Sistema de visión hiperspectral para el estudio de especies arbóreas tropicales. Revista Tecnología en Marcha, 35(6), Pág. 16–23. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6239>

Sistema de visión hiperespectral para el estudio de especies arbóreas tropicales



PDF

Publicado: jun 7, 2022

DOI:
<https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6239>

Palabras clave:
Especies arbóreas reflectancia

Arnoldo Ramírez-Jiménez

Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-7090-4465>

Dagoberto Arias-Aguilar

Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>

Juan Carlos Valverde-Otárola

Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-3181-1346>

Nelson Zamora-Villalobos

Laboratorio de Aplicaciones Ecofisiológicas. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-6242-3725>

María Rodríguez-Solís

Centro de Investigación en Innovación Forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-4605-6152>

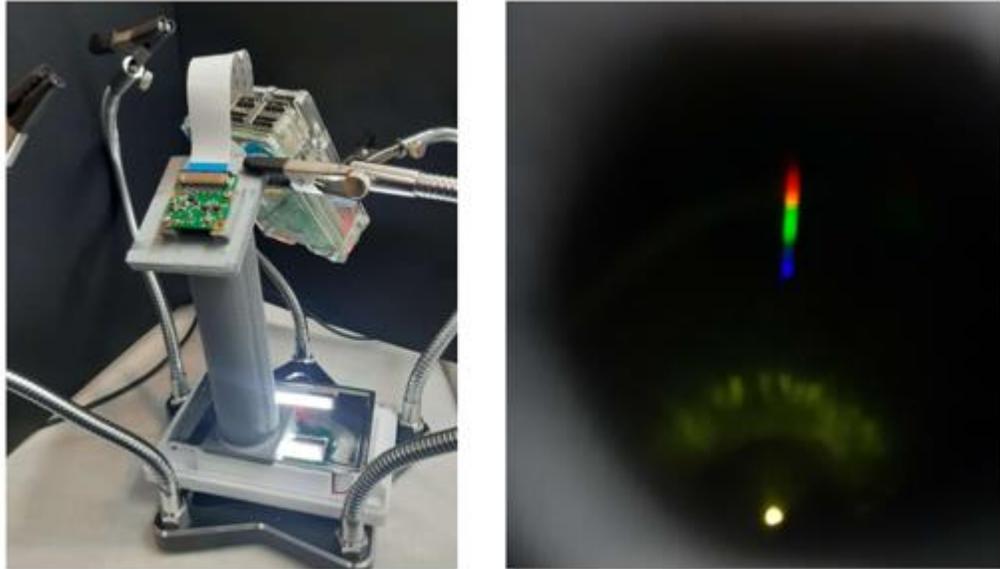
Ernesto Montero-Zeledón

Laboratorio de Espectroscopía. Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0002-4545-5805>

12.1.2.1 Principales resultados

En la Figura 12 se muestra el detalle del dispositivo desarrollado y la imagen de la adquisición de una fotografía con las bandas espectrales obtenidas de una hoja. En total se trabajó con 4 especies para efectos de la calibración y comparación del instrumento desarrollado con otro de tipo comercial.



Instrumentalización
para el muestreo de la
Reflectancia en árboles
del Trópico Mesoamericano

Figura 12. Detalle del dispositivo SpectraTEC desarrollado en el laboratorio ECOPLANT. (A la izquierda el dispositivo y a la derecha la imagen de las bandas espectrales para una hoja).

En la figura 13, se pueden observar las firmas espectrales obtenidas para la especie *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 una 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 atención al objetivo específico 2, el dispositivo desarrollado alcanzó una precisión del 95%, o sea superior al esperado.

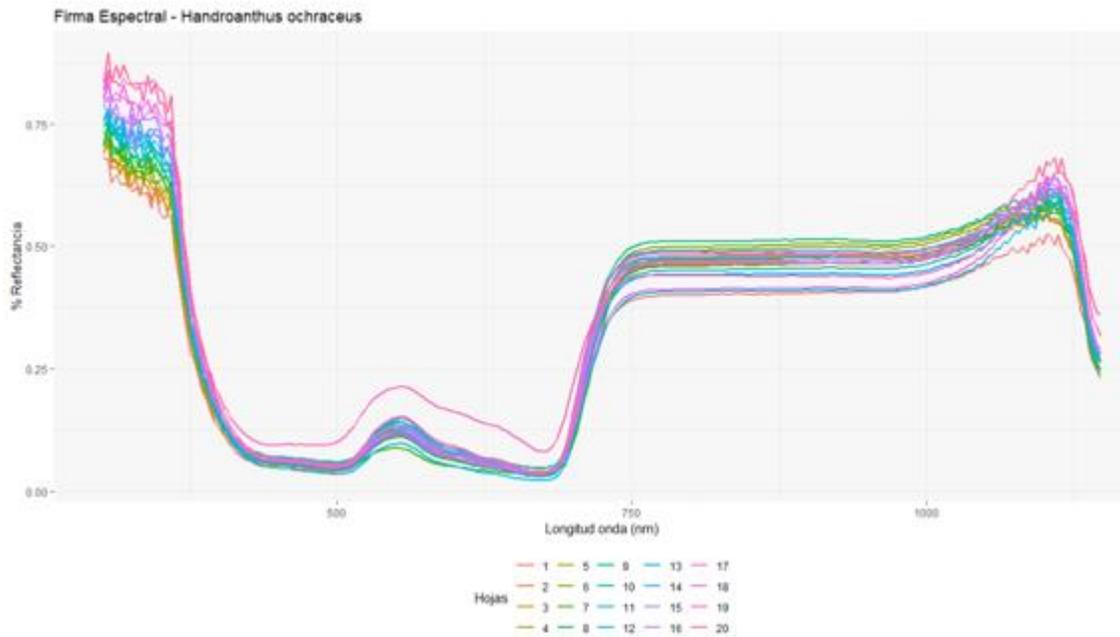


Figura 13. Detalle de las firmas hiperespectrales de 20 hojas de la especie *Handroanthus ochraceus* obtenidas con SpectraTEC

12.1.3 Automatización de un sistema de visión hiperespectral para hojas de especies forestales (TFG Paulina Mendez)

El tercer trabajo de graduación de licenciatura fue elaborado por la estudiante Paulina Méndez Fallas de la carrera de Mecatrónica y tuvo como nombre “*Automatización de un sistema de visión hiperespectral para hojas de especies forestales*”

En este proyecto de graduación se enfocó en la automatización de la toma de imágenes con el SpectraTEC y de esta manera perfeccionar el sistema de visión hiperespectral para el estudio de especies forestales en el Laboratorio ECOPLANT. El problema es que no existe un equipo automatizado para la captura de imágenes. El diseño propuesto permite el movimiento de la cámara en 3 ejes con un error de posicionamiento menor al 2 % y el monitoreo constante del sistema de iluminación con un error menor al 10 % en sus mediciones de intensidad lumínica.

12.1.3.1 Principales resultados

Con base en los resultados obtenidos este trabajo se encontró que el diseño planteado cumple con el factor de seguridad para el conjunto mecánico. Además, cuenta con un peso de 2.3 kg como lo muestra la figura que sigue a continuación y dimensiones máximas de 32x32x32 cm, manteniendo dentro de los valores establecidos por el cliente para estos parámetros.

El equipo desarrollado se califica como portátil, ya que su peso cumple con la norma establecida por el ministerio de trabajo y seguridad social, la cual indica que un trabajador puede movilizar cargas de hasta 20 kg.

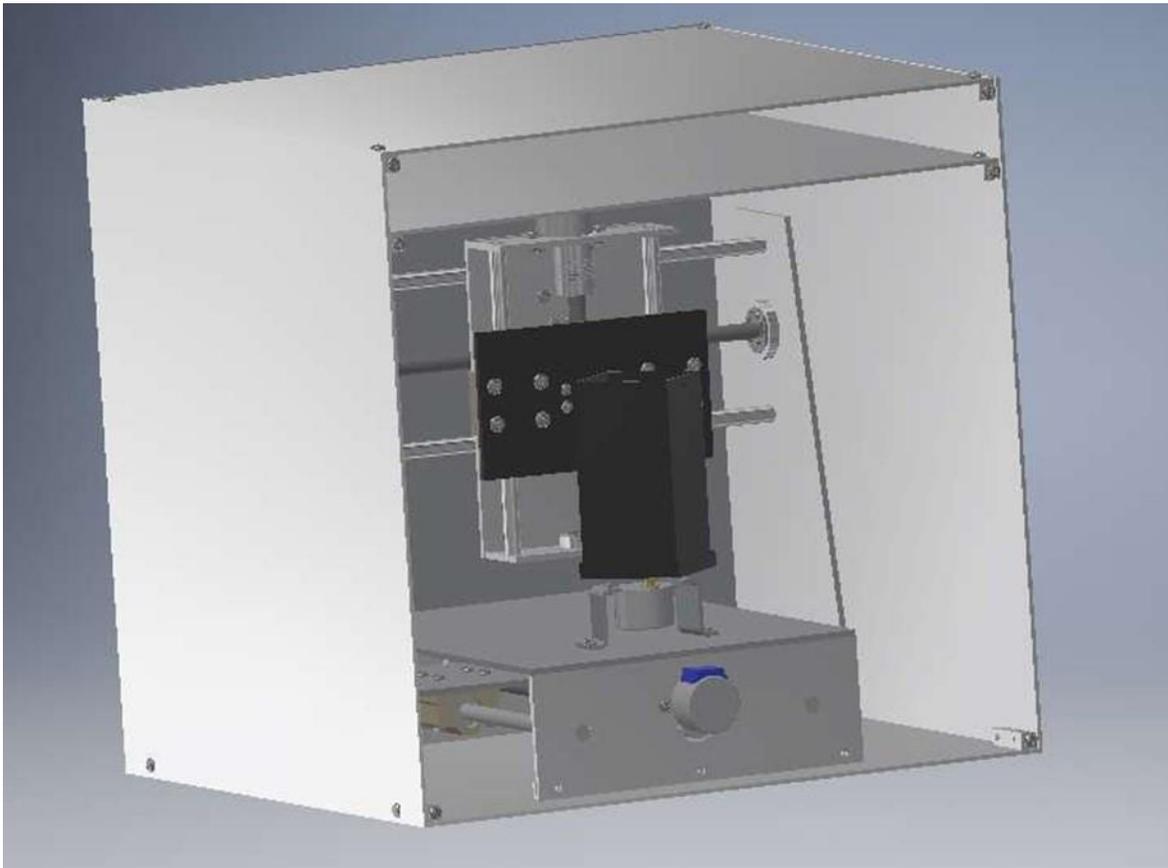


Figura 14. Modelo 3D del dispositivo desarrollado. Elaborado por Paulina Méndez en Autodesk Inventor.

Adicionalmente se diseñó un sistema de iluminación controlado (Figura 15) para optimizar la adquisición de imágenes. Dentro de los resultados obtenidos en esta investigación destaca el ajuste necesario en la selección de colores según el objeto que se desee analizar, y que permite cubrir todas las bandas de colores contenidas en el mismo. Además, para la captura de imágenes hiperespectrales se requieren al menos 6 canales distintos de color, y al aumentar esta cantidad también aumenta la validez de las imágenes.

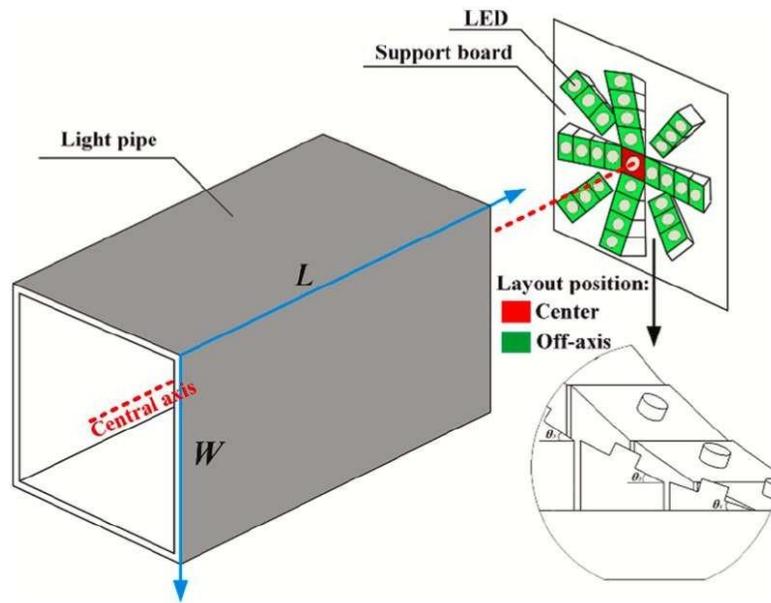
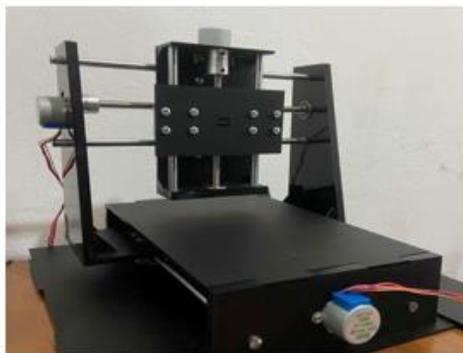
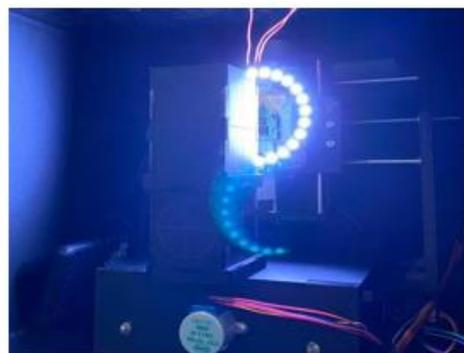


Figura 15. Diseño de un sistema de iluminación para la toma de imágenes. Elaborado por Paulina Mendez.

A partir del diseño mecánico propuesto, se construyó el prototipo que se muestra en la figura 16. Las piezas de la prueba de concepto fueron maquinadas en cortadora láser, utilizando láminas de acrílico de 3mm de espesor como material base. Este dispositivo cuenta con una resistencia a la tracción de 69 MPa y resistencia a la flexión de 100 MPa, se estima que el esfuerzo máximo en estas estructuras no excede los 900 kPa, por lo que es posible afirmar que el acrílico será capaz de soportar las cargas involucradas. Además, su costo y tiempo de maquinado son menores debido a los métodos utilizados. Para garantizar la estabilidad de las partes durante el movimiento fue necesario utilizar piezas adicionales tipo nervio o escuadras, que se colocan entre las piezas, de manera que aquellas que deben ser perpendiculares entre sí para que conserven esta característica en todo momento.



a. Dispositivo construido



b. Dispositivo en funcionamiento

Figura 16. Detalle del dispositivo funcional que complementa las capacidades del SpectraTEC.

La validación del conjunto de componentes desarrollados se realizó mediante la integración de todos sus subsistemas, electromecánico y de iluminación. En esta etapa se verificó que la solución propuesta fuera capaz de llevar a cabo los pasos necesarios para la captura de múltiples imágenes hiperespectrales en múltiples muestras forestales. Para esto, se colocó el dispositivo en un entorno cercano al presente durante un trabajo de campo, en este caso, corresponde a la parte trasera de un vehículo estacionado. El objetivo de estas pruebas es la comprobación de que el dispositivo es capaz de permitir el montaje del módulo de cámara y de realizar los movimientos necesarios para el análisis de las muestras.

Para las pruebas se utilizaron muestras de hoja de la especie *Begonia* sp (Figura 17), las cuales cuentan con un rango de dimensiones que va desde los 3 cm de ancho y 5 cm de largo hasta los 5 cm de ancho y 8 cm de largo. Debido al enfoque del proyecto, las imágenes no son procesadas y no se cuenta con el algoritmo de control de la cámara, por lo que únicamente se verificó el cumplimiento de la secuencia y no la calidad de las fotos capturadas. Debido a esto, durante las pruebas las fotos fueron capturadas mediante comunicación SSH entre una computadora portátil y la Raspberry Pi.

Como se observa, las imágenes muestran una gran calidad de detalle en la mayor parte de su área. Además, es posible notar como cada imagen fue capturada en un punto distinto de la muestra, como lo desea el usuario. Las mismas fueron capturadas tras desplazamientos de 1 mm en cada dirección. Finalmente, para comprobar que el dispositivo es capaz de completar la secuencia completa en múltiples ecuaciones, se realizan 5 iteraciones de la misma. Durante esta prueba se llevaron a cabo mediciones de duración que permitieran comprobar que el análisis se realiza en el tiempo permitido por el usuario, el mismo se encuentra descrito en las especificaciones y debía ser menor a 10 minutos. Entre menor sea el tiempo de análisis, mayor es la validez de las imágenes capturadas, ya que al tratarse de muestras naturales estas empiezan a perder sus propiedades al ser cortadas (turgencia, color).

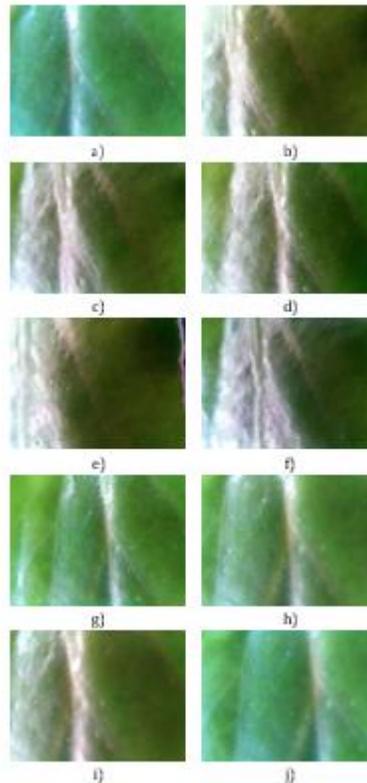


Figura 17. Imágenes obtenidas con el módulo de cámara v2 para Raspberry Pi. Elaborado por Paulina Méndez

Finalmente, se calculó el ahorro obtenido por el laboratorio ECOPLANT al implementar la solución diseñada en lugar de optar por las opciones presentes en el mercado. El precio base de los equipos de espectroscopía portátil ronda los \$ 11300, variando según el modelo y alcance en ancho de longitud de onda. Al comparar este precio con el costo de los materiales necesarios para la implementación del diseño propuesto, se pudo demostrar el beneficio económico que este aporta al laboratorio. En este caso, el ahorro sería de aproximadamente de \$10 000, indicando que la solución propuesta es 10 veces más económica que la solución base disponible en el mercado.

Entre las principales ventajas que presenta el diseño propuesto sobre aquellos comerciales se encuentra el análisis de múltiples muestras de manera simultánea. Como beneficio adicional se tiene la posibilidad de análisis de muestras de corteza, una característica que no poseen los equipos en el mercado, ya que aquellos que permiten este tipo de análisis requieren de un pre-tratamiento de la muestra para la adaptación de su tamaño, aumentando el tiempo destinado a la captura de imágenes.

12.1.4 Principales conclusiones OE1

1. Se seleccionó una técnica para la toma de imágenes hiperespectrales basada en un conocimiento referente a los diferentes campos de la mecatrónica, permitiendo así armonizar el desarrollo del instrumento hiperespectral y contrarrestando aspectos tanto de costos como de funcionalidad establecidos por Ecoplant.

2. Se logró en la primera etapa desarrollar un instrumento hiperspectral con una resolución espectral 9.9868 nm en un rango de 350 nm a 750 nm, con un 2% de ancho de banda, para 35 bandas en el rango mencionado y una resolución espacial de 0.001781658 mm²/pix.
3. Mediante técnicas de visión por computadora fue posible obtener un mapa de calor que indicara la distribución superficial de la luminancia en una hoja arbórea y un valor puntual de luminancia para construir una firma espectral a nivel pixelar en una imagen.
4. Para el desarrollo del instrumento hiperspectral basado en la cámara Raspberry pi se estimó un costo de inversión de 862 dólares, siendo menor a los 1500 dólares propuestos como límite.
5. 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.
6. El porcentaje de precisión promedio final de la reflectancia obtenida en el dispositivo SpectraTEC 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.
7. 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.
8. 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 los usuarios.
9. La obtención, procesamiento y análisis de firmas hiperspectrales 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 información útil para construir los índices de vegetación y para la toma de decisiones sobre productividad de cultivos y la sustentabilidad de la producción.
10. Se diseñó la estructura mecánica que permite el movimiento de la cámara o sensor hiperspectral en tres ejes de movimiento con un error máximo de 1.7 % en su posicionamiento y una desviación máxima de $\pm 0,26$ mm y se demostró su funcionalidad.
11. Se diseñó un sistema de iluminación capaz de generar el espectro necesario para la captura de imágenes hiperspectrales, y su respectivo sistema de monitorización con un error máximo de 8.7% y una desviación máxima de 12.26 lx en sus lecturas de intensidad lumínica.

12. Se validó el funcionamiento del diseño mediante la implementación de un prototipo funcional, obteniendo imágenes de prueba capturadas por un módulo de cámara para Raspberry Pi, un 100% de repetibilidad en la secuencia programada y un tiempo promedio de 2 minutos y 3 segundos por análisis.

12.2 OE2. Procesar las imágenes de las especies para generar datos hiperespectrales y anatómicos de las especies de estudio con alta precisión (93%).

En este objetivo se definió una colección de metadatos de firmas hiperespectrales de hojas y madera de al menos 50 especies arbóreas tanto en madera y hojas. Las fichas de las 50 especies, están debidamente documentadas en el TFG de Kevin Arias y en la publicación denominada “Using Deep Learning to Identify Costa Rican Native Tree Species From Wood Cut Images” Con la información de las fichas de especies se elaboró la base de datos “CRTreeCuts” que contiene 147 especies y además se trabajó en la interfaz gráfica en Kaggle que contiene la información de firmas. Los resultados de esta sección muestran varios productos en versión de artículos científicos que se publicaron a partir del 2022. Cada producto obtenido o sus resultados más importantes, se presentan en diferentes secciones.

12.2.1 Artículo Uso del aprendizaje profundo para identificar especies de árboles nativos de Costa Rica a partir de imágenes de cortes de madera

12.2.1.1 *Resumen del artículo*

Figuroa-Mata, G., Mata-Montero, E., Valverde-Otárola, J. C., Arias-Aguilar, D., & Zamora-Villalobos, N. (2022). Using deep learning to identify Costa Rican native tree species from wood cut images. *Frontiers in Plant Science*, 13, 789227.

El objetivo principal de este trabajo fue utilizar la base de datos de características de la madera para buscar una aplicación de todos los resultados mediante las técnicas de aprendizaje profundo en la identificación de nativas de Costa Rica. Como producto general se desarrolló un nuevo protocolo práctico, no destructivo, que utiliza menos espacio en xilotecas, y que resulta más rápidamente en un número de muestras apropiadas para diferentes aplicaciones. Además se implementó una CNN para la identificación automatizada de especies arbóreas basada en imágenes macroscópicas de cortes de madera y que tiene una precisión superior al 70%, para al menos 70 especies arbóreas, evitando sesgos experimentales como el SSPB (Same- Specimen -Picture Bias) descrito en Carranza-Rojas *et al.* (2018).

12.2.1.2 *Base de datos generada*

La base de datos de imágenes de maderas consta de 656 muestras de 147 especies arbóreas de Costa Rica. Incluye 42 familias y 110 géneros. Comprende alrededor de 3.516 imágenes de cada una de las tres secciones, a saber, transversal, radial y tangencial, en dos condiciones, seca y fresca; es

decir, aproximadamente, $3, 516 \times 3 \times 2 = 21\ 096$ imágenes. Cada imagen está en formato JPG sin comprimir con una resolución de 2.592×1.944 píxeles, aunque hay algunas imágenes de menor resolución. La base de datos de hojas cubre de manera completa 30 especies por 5 hojas por árbol por 5 mediciones por hoja para un total de 750 firmas hiperespectrales.

Con la basta información generada por este proyecto y de proyectos de investigación anteriores, se tienen nuevos elementos para formular una nueva propuesta de investigación que brinde una solución tecnológica a la problemática de acceso público a bases de datos de variables ecofisiológicas, firmas hiperespectrales, imágenes de hojas y maderas de especies forestales del trópico americano, y que ponga a disposición de usuarios la información validada así como las rutinas de análisis, brindando los créditos a los autores y al TEC como institución.

12.2.1.3 Principales resultados

Se logró un flujo de trabajo innovador que define protocolos para la recogida no destructiva de muestras sobre el terreno, procesar las muestras, tomar fotografías y anotar fotografías y anotarlas en una base de datos. Como resultado, se ha complementado la xiloteca del Instituto Tecnológico de Costa Rica con 656 muestras de madera de 147 especies arbóreas de Costa Rica.

En este sentido, se deja una base de datos CRTreeCuts que representa aproximadamente al 8,5% del número de especies arbóreas del país y al 15% de las especies maderables. Sin embargo, aunque es fundamental aumentar el tamaño y la cobertura taxonómica de los conjuntos de datos, las visitas de campo y giras de campo por su alto costo siempre serán una limitante y el trabajo de laboratorio con esas muestras sigue siendo lento y costoso.

12.2.2 Ampliación y producto 1 del OE2: Definición de un método indirecto para la estimación de la productividad y biomasa arriba del suelo en plantaciones de *Tectona grandis* L. (teca), mediante la utilización del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el de diferencia normalizada verde (GNDVI) y ajustado al suelo (Savi)

Mediante una solicitud formal a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, se gestionó y aprobó una ampliación al OE2 para cubrir el período del 2022, y que incluyó las actividades de una tesis de maestría, siendo que los alcances del producto 1 de la ampliación incluyen 1 artículo publicado y dos artículos listos en proceso de publicación. A continuación, se presentan los artículos en secciones separadas.

12.2.3 Resultados del primer artículo “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”

12.2.3.1.1 Resumen del artículo

Artículo

Porras-Granados, A. V., Arias-Aguilar, D., Soto-Montoya, C., & Ríos-Garro, V. (2022). 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. *Revista Tecnología En Marcha*, 35(6), Pág. 5–15. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i6.6229>

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 en 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.

12.2.3.1.2 Principales resultados

Se generó el protocolo 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 fue calculado para cada parcela.

12.2.4 Resultados del segundo artículo del producto 1: Modelos alométricos para la estimación de volumen y biomasa en una plantación forestal de *Tectona grandis* L.f., mediante imágenes satelitales Sentinel-2

Este artículo fue sometido a la revista chilena *Bosque* y está en proceso de evaluación. En esta sección se presenta el correo de envío del artículo y se transcribe el documento completo tal y como fue enviado a la revista.

----- Forwarded message -----

De: Editor Committee <revistabosque@uach.cr>

Date: mar, 4 de jul de 2023, 08:19

Subject: [BOSQUE] 1. Receipt of complete submission and notification of initial revision

To: Arleth Porras Granados <avporras.08@gmail.com>

Dear Author,

Please be informed that we have received your complete submission of your manuscript, entitled "Allometric models for the estimation of volume and biomass in a forest plantation of *Tectona grandis* l.f., using Sentinel-2 satellite images".

Before starting the peer-review process, in this initial phase, the Editor Committee will review your manuscript to ensure the topic addressed is within the scope of the journal and whether it complies with the Instructions for Authors.

You will be notified about the status of your manuscript soon.

Best regards,

Revista Bosque

Modelos alométricos para la estimación de volumen y biomasa en una plantación forestal de *Tectona grandis* l.f., mediante imágenes satelitales Sentinel-2

Allometric models for the estimation of volume and biomass in a forest
plantation of *Tectona grandis* l.f., using Sentinel-2 satellite images

Arleth V. Porras-Granados^a

Casia Soto-Montoya^b

Dagoberto Arias-Aguilar^c

Heileen Aguilar-Arias^d

Iván Ávila-Pérez^e

Cornelia Miller-Granados^f

* Autor de correspondencia: ^aInstituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0474-4774>,
avporras.08@gmail.com

^bInstituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2275-7317>.

^cInstituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago, Costa Rica,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3056-9172>.

^dCentro Nacional de Alta Tecnología de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, San José, Costa
Rica, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5838-3225>

^eCentro Nacional de Alta Tecnología de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, San José, Costa
Rica, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4093-2799>

^fCentro Nacional de Alta Tecnología de Costa Rica, Laboratorio PRIAS, San José, Costa Rica, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9460-626X>

12.2.4.1.1 Resumen

La falta de metodologías que permitan la estimación indirecta de la productividad de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Costa Rica, genera un vacío de información, que limita las posibilidades de los productores de tomar decisiones sobre el manejo y mantenimiento de sus plantaciones, de una manera más eficiente y bajando los costos de producción, es por esto que, este estudio tiene como objetivo generar modelos matemáticos que permitan estimar el volumen, biomasa aérea y total en plantaciones de *Tectona grandis*, mediante variables dasométricas, índices de vegetación y valores de las bandas espectrales obtenidas mediante imágenes satelitales Sentinel-2. Se generaron 10 modelos para cada variable, utilizando los métodos de *backward*, *forward* y *stepwise*, para seleccionar el de mejor ajuste a los datos y realizar la validación de estos. Para el volumen, el mejor modelo de ajuste de los datos correspondió a

$\text{vol} = 9.93 - 1.87 * B2 + 3.66 * B3 - 1.59 * B5 + 0.12 * B6$, con un R^2 ajustado de 0.49.

Mientras que para la biomasa aérea, el mejor modelo de ajuste fue

$\text{AGB} = -24.83 + 4.11 * \text{Edad} + 0.91 * B3 - 0.37 * B4 - 0.56 * B5 + 0.40 * B6 - 0.23 * B8A$

y para la biomasa total fue

$B_t = -108.10 + 7.18 * \text{Edad} + 1.62 * B3 - 0.59 * B4 - 0.97 * B5 + 0.64 * B6 - 0.39 * B8$

, con valores de R^2 ajustado de 0.71 y 0.74 respectivamente. La validación de los modelos se realizó mediante la prueba del % Sesgo y la prueba Wilcoxon, en donde para los tres modelos escogidos, Wilcoxon generó valores superiores al p-valor (0.05), lo que indica que estos no poseen sesgo.

Palabras claves: volumen, biomasa, bandas espectrales, índices de vegetación, multiespectral.

12.2.4.1.2 Abstract

The lack of methodologies that allow the indirect estimation of the productivity of teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations in Costa Rica, creates an information gap, which limits the possibilities of producers to make decisions about the management and maintenance of their plantations in a more efficient way and lowering production costs, which is why this study aims to generate mathematical models that allow estimating the volume, aerial and total biomass in *Tectona grandis* plantations, through dasometric variables, vegetation indices and values of the spectral bands obtained by Sentinel-2 satellite images. 10 models were generated for each variable, using the backward, forward, and stepwise methods, to select the one with the best fit to the data and perform their validation. For the volume, the best fit model of the data corresponded to $vol = 9.93 - 1.87 * B2 + 3.66 * B3 - 1.59 * B5 + 0.12 * B6$, with an adjusted R^2 of 0.49. While for aerial biomass the best adjustment model was $AGB = -24.83 + 4.11 * Edad + 0.91 * B3 - 0.37 * B4 - 0.56 * B5 + 0.40 * B6 - 0.23 * B8A$ and for the total biomass it was $B_t = -108.10 + 7.18 * Edad + 1.62 * B3 - 0.59 * B4 - 0.97 * B5 + 0.64 * B6 - 0.39 * B8$, with adjusted R^2 values of 0.71 and 0.74 respectively. The validation of the models was carried out using the % Bias test and the Wilcoxon test, where for the three chosen models, Wilcoxon generated values greater than the p-value (0.05), which indicates that they do not have bias.

Keywords: volume, biomass, spectral bands, vegetation indices, multispectral.

12.2.4.1.3 Introducción

Una de las especies maderables tropicales más importantes en términos comerciales es la teca (*Tectona grandis*), con un área plantada a nivel mundial de aproximadamente 6,8 millones de hectáreas (Madeiros *et al.*, 2018). En Costa Rica, esta especie es la más utilizada en reforestación comercial con una superficie reportada al año 2021, de aproximadamente 48 929 hectáreas sembradas (Instituto Nacional de Estadística y Censos,

2022) La teca ha sido establecida, bajo distintos sistemas de producción a lo largo del país, siendo mayoritariamente plantada en la Península de Nicoya (Arce y Barrantes, 2006 y De Camino y Morales, 2013).

Asimismo, de acuerdo con la Oficina Nacional Forestal de Costa Rica (2022), para finales del año 2022, la teca fue la tercera especie de mayor valor económico en condición de madera aserrada, con un valor de 1013 colones por PMT (pulgada maderera tica, según el sistema tradicional de cubicación, con una equivalencia de 362 PMT/ m³). Además del alto valor comercial de esta especie, el uso en reforestación se debe también a tres características importantes como lo son: relativo rápido crecimiento en el trópico, calidad de la madera que permite un amplio rango de usos y propiedades de durabilidad sobresalientes (Mora y Hernández, 2007 y Ladrach, 2009).

Sumado a lo anterior, el aumento de la demanda de esta especie en el mercado forestal se ha propiciado año con año; lo cual ha desencadenado una expansión intensiva de su cultivo (Pérez y Kanninen, 2007 y Fallas, 2017) y se ha convertido en una fuente importante de generación de ingresos para muchos de los productores forestales de Costa Rica, generando así aportes significativos a la economía nacional.

Es por ello que, las estimaciones de la productividad con buena precisión y al menor costo en las plantaciones de teca a nivel nacional son de suma importancia. De acuerdo con Chávez *et al.*, (2021), conocer la productividad de una plantación forestal permite establecer un adecuado manejo forestal, siendo que el volumen y la biomasa son variables indicativas de la capacidad productiva de un ecosistema forestal (Méndez *et al.*, 2012 y Hernández-Ramos *et al.*, 2017).

Tanto la estimación del volumen; como de la biomasa, pueden realizarse de forma directa e indirecta (Aquino-Ramírez *et al.*, 2015 y Martínez *et al.*, 2016). Según Berra *et al.*, (2012) y Solano *et al.*, (2014) la estimación de ambas variables es posible a través del método directo donde es necesaria la corta de los árboles, mientras que, el método indirecto se realiza a partir de ecuaciones alométricas. A diferencia del método directo que implica el derribo del árbol, el uso de los métodos indirectos posee como ventajas una mayor

precisión en la extrapolación a hectárea, menores costos, mayor rapidez y rigor en las mediciones (Daryaei y Sohrabi, 2016, Trisasongko y Paull, 2018 y Chávez *et al.*, 2021).

En la última década, ha cobrado relevancia el uso de imágenes satelitales, donde es posible realizar estimaciones de atributos forestales mediante modelos alométricos que toman valores numéricos de las imágenes del sensor y sus derivados, con relación a las mediciones o estimaciones de variables dasométricas en el campo (Staben, *et al.*, 2018 y Chrysafis *et al.*, 2017). Específicamente se han realizado estimaciones tanto de volumen como biomasa utilizando directamente los valores de reflectancia de las bandas de imágenes satelitales como Sentinel, Landsat, entre otros, así como los índices de vegetación obtenidos de las mismas bandas, donde se destacan el Índice de Diferencia Normalizado (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizado en Verde (GNDVI) (Pandit *et al.*, 2018, Moradi *et al.*, 2022 y Zhang *et al.*, 2022). Para la determinación de estos estimados, y con la finalidad de encontrar las relaciones más eficaces con respecto a los atributos forestales, tales como volumen, biomasa, contenido de nitrógeno foliar, entre otros; se han utilizado una gran variedad de métodos estadísticos, entre los cuales se destacan los modelos de regresión lineal, no lineal, lineales generalizados, *random forest* entre otros. (Coulston *et al.*, 2012, Acosta *et al.*, 2017, López-Sánchez *et al.*, 2017 y Wilson *et al.*, 2018).

El objetivo del presente estudio es generar ecuaciones alométricas que permitan valorar la eficacia de la estimación de la productividad de plantaciones de *Tectona grandis*, en términos de volumen y biomasa aérea y total, mediante la utilización de variables dasométricas, índices de vegetación y valores de las bandas espectrales obtenidas a partir de imágenes satelitales Sentinel-2. Todo esto, con la finalidad de contribuir al uso de los métodos indirectos con imágenes satelitales para el manejo de plantaciones forestales, como un aporte desde los estudios científicos a la aplicación directa en el mercado y un impacto directo sobre la economía de las personas productoras/inversionistas en la disminución de sus costos.

12.2.4.1.4 Materiales y métodos

12.2.4.1.4.1 Área de estudio y descripción de condiciones de la plantación

El estudio se realizó en plantaciones clonales de *T. grandis* propiedad de la empresa Panamerican Woods, las cuales se ubican en San Francisco de Coyote, Nandayure, Guanacaste, Costa Rica (-85.268, 9.798, -85.209, 9.879). El sitio posee una topografía muy variada, la cual va desde terrenos muy planos hasta montañas con pendientes considerables, el 45% del área corresponden a terrenos planos, mientras que el resto corresponde a terrenos con pendiente en elevaciones que oscilan entre los 0 y los 108 msnm (CNE, 1993). A su vez, la precipitación pluvial media del sitio es de 1888 milímetros al año y posee temperaturas que van desde los 25°C hasta los 37°C (CNE, 1993 y Fonseca-González *et al.*, 2021).

Los suelos del área de estudio se clasifican como Ultisoles (Mata *et al.*, 2013) con un marcado déficit hídrico durante la época seca (Dirección de agua, 2019). El área total del estudio abarcó aproximadamente 216,8 hectáreas, en las cuales se muestreó un total de 36 parcelas de edades entre 1 hasta 16 años.

12.2.4.1.4.2 Estimación de parámetros forestales

Las tres variables del rodal consideradas fueron el volumen total, la biomasa aérea y la biomasa total, las cuales fueron determinadas mediante la medición de una muestra de árboles y el uso de modelos alométricos ya existentes. Para el volumen se utilizó la ecuación 1, propuesta por Fallas-Zúñiga (2017).

$$V = (0.0884 + 0.0297 * dap)^2 \quad [1]$$

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

Mientras que, para la biomasa aérea y la biomasa total, se utilizaron dos modelos alométricos, uno propuesto por Pérez y Kanninen (2007) (ecuación 2) y el otro propuesto por Fonseca *et al.*, (2020) (ecuación 3), respectivamente, los cuales se detallan a continuación.

$$\log_{10}AGB = -0.815 + 2.272 * \log_{10}dbh \quad [2]$$

Donde: AGB es igual a la biomasa aérea total (kg) y dbh es igual al diámetro a la altura de pecho (cm).

$$B_{total} = \exp (-2.02268 + 2.56319 * \ln(Dap)) \quad [3]$$

Donde: Btotal es igual a la biomasa total estimada (kg) y Dap es igual al diámetro a la altura de pecho (cm).

Para las estimaciones de los valores por hectárea mediante el uso de las tres ecuaciones presentadas anteriormente, se establecieron 36 parcelas de 60 x 60 metros; y se midió en el campo la variable dasométrica diámetro a la altura del pecho (1,3 metros), con una intensidad de muestreo cercana al 10%. Además, se recolectaron los datos de edad, área del lote y número de árboles por hectárea. Una vez recolectada la información, se aplicaron las ecuaciones y los resultados fueron extrapolados al total de árboles por parcela (entre 214 a 683 árboles promedio por parcela) y convertidos a m³/ha para el volumen y a ton/ha para la biomasa.

12.2.4.1.4.3 Obtención de información satelital.

De la plataforma de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) se descargó la imagen satelital más cercana a la fecha de toma de los datos de campo, la cual se puede encontrar en la plataforma de Copernicus bajo el identificador S2B_MSIL2A_20211109T160459_N0301_R097_T16PFR_20211109T204306. Debido al nivel de procesamiento de la imagen; el cual corresponde a 2A, y para los efectos de este estudio, no se necesitó ningún tipo de corrección adicional. Para esta imagen se descargaron las bandas correspondientes desde la banda 2, hasta la banda 8A (cuadro 4), de las cuales, las que poseían una resolución de 20 m, fueron remuestreadas a una resolución de 10 m a través el software QGis 3.16.16. Una vez obtenidas estas bandas, se procedió a re proyectar las mismas, bajo el sistema de coordenadas CRTM05 mediante el software QGis 3.16.16, y posteriormente utilizando el mismo software y la herramienta calculadora ráster, se calcularon los índices de vegetación de interés. Los índices calculados fueron el Índice de Vegetación Normalizado y el Índice de Vegetación Normalizado en Verde (NDVI y GNDVI correspondientemente, por sus siglas en inglés).

Cuadro 4. Características originales de las bandas del sensor Sentinel 2A, utilizadas en este estudio.

Table 4. Original characteristics of the Sentinel 2A sensor bands used in this study.

Banda	Longitud de la onda (μm)	Resolución (m)	Abreviatura
Azul	0.45-0.52	10	B2
Verde	0.54-0.57	10	B3
Rojo	0.65-0.68	10	B4
Borde del rojo 1	0.69-0.71	20	B5
Borde del rojo 2	0.73-0.74	20	B6
Borde del rojo 3	0.77-0.79	20	B7
Infrarrojo cercano 1	0.78-0.90	10	B8
Infrarrojo cercano 2	0.85-0.87	20	B8A

El cálculo matemático aplicado en la calculadora ráster corresponde a las ecuaciones que determinan estos índices, las cuales se detallan en el cuadro 5.

Cuadro 5. Índices de vegetación calculados y sus ecuaciones correspondientes.

Table 5. Calculated vegetation indices and their corresponding equations.

Índice de vegetación	Ecuación	Referencia
NDVI	$(\text{NIR-Red})/(\text{NIR+Red})$	(Rouse, Haas, Schell & Deering, 1974)
GNDVI	$(\text{NIR-Verde})/(\text{NIR+Verde})$	(Gitelson & Merzlyak, 1998)

Posterior a esto, se extrajeron los valores promedios de las bandas y de los índices de vegetación calculados para cada parcela, utilizando una capa vectorial de las parcelas en estudio y la herramienta estadística de zona del software QGis 3.16.16.

12.2.4.1.4.4 Análisis estadístico y selección del modelo de mejor ajuste

Inicialmente se consolidó la base de datos de la muestra de árboles en cada parcela y se depuró la base de datos con la finalidad de corregir errores y detectar valores inconsistentes (por ejemplo, árboles descopados, enfermos o muertos). Posterior a esto se aplicó un análisis de correlación de Pearson para determinar la relación entre las variables del rodal y los índices de vegetación, la edad y las bandas espectrales.

Una vez realizadas la depuración y el análisis de correlación, la base de datos fue dividida en dos grupos, un primer grupo con el 80% de los datos para el ajuste del modelo y el segundo grupo con el 20% de los datos para la posterior validación del modelo escogido.

Con el primer grupo, se procedió a ajustar los modelos de regresión lineal múltiple para determinar las variables que predicen de una manera más eficiente los parámetros forestales estudiados. Para el parámetro de volumen, se utilizó el método de regresión *stepwise* (paso a paso), utilizando un p-valor de entrada y retención en el modelo de $\alpha=0,1$; mientras que, para los parámetros de biomasa aérea y biomasa total, se probaron los tres procedimientos, *forward*, *backward* y *stepwise*, utilizando el programa RStudio 4.2.0, se generaron los 10 mejores modelos de ajuste, con mayor R^2 ajustado y con el menor error cuadrático medio (ECM).

El modelo general utilizado fue de la forma (ecuación 4):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon_j \quad [4]$$

Dónde: Y= Parámetro forestal por estimar (volumen, biomasa aérea y biomasa total), Xn = Bandas espectrales e índice de vegetación, βn = Coeficientes de regresión y εi = Error aleatorio.

Una vez obtenidos los mejores modelos de ajuste, se procedió a validar el modelo escogido, mediante las pruebas de % Sesgo y la prueba de Wilcoxon.

12.2.4.1.5 Resultados

Las estadísticas descriptivas para las variables utilizadas se presentan en el cuadro 6. Los resultados muestran que los valores de diámetro promedio oscilan entre 9.78 a 34.01 cm, con un valor medio de 23.74 cm. Mientras que, para el volumen, la biomasa aérea y la biomasa total, los valores se encuentran entre de 99.50 a 302.29 m³ ha⁻¹, de 25.60 a 157.03 ton ha⁻¹ y de 33.94 a 258.45 ton ha⁻¹, con valores medios de 210.63 m³ ha⁻¹, 99.05 ton ha⁻¹ y 154.03 ton ha⁻¹ respectivamente.

Cuadro 6. Estadísticas descriptivas de los parámetros forestales utilizados en el estudio.

Table 3. Descriptive statistics of the forest parameters used in the study.

Variable*	Mínimo	Máximo	Promedio	StD**
Dap	9.78	34.01	23.74	6.07
Vol	99.50	302.29	210.63	47.50
AGB	25.60	157.03	99.05	32.29
Bt	33.94	258.45	154.03	54.52

*Dap= Diámetro medido a 1.3 m de la base del suelo del árbol (cm), Vol= Volumen (m³ ha⁻¹), AGB = Biomasa forestal aérea (ton ha⁻¹) y Bt= Biomasa forestal total (ton ha⁻¹). **StD= desviación estándar.

Los resultados obtenidos de la correlación de Pearson entre el volumen, la biomasa forestal aérea y la biomasa forestal total con el NDVI, GNDVI y las diferentes bandas espectrales se presentan en el cuadro 7.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los parámetros forestales (volumen, biomasa forestal aérea y biomasa forestal total) y variables espectrales.

Table 7. Pearson correlation coefficients (r) between forest parameters (volume, aboveground forest biomass and total forest biomass) and spectral variables.

<i>Edad</i>	<i>Vol</i>	<i>AGB</i>	<i>Bt</i>	<i>NDVI</i>	<i>GNDVI</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B5</i>	<i>B6</i>	<i>B7</i>	<i>B8</i>	<i>B8A</i>	
Edad	1													
Vol	0.54	1												
AGB	0.74	0.95	1											
Bt	0.76	0.93	1.00	1										
		-	-											
NDVI	-0.42	0.09	-0.20	0.22	1									
		-	-											
GNDVI	-0.57	0.39	-0.44	0.43	0.77	1								
B2	0.82	0.48	0.64	0.66	-0.54	-0.68	1							
B3	0.73	0.56	0.63	0.63	-0.51	-0.82	0.90	1						
B4	0.80	0.39	0.56	0.58	-0.61	-0.66	0.96	0.85	1					
B5	0.65	0.50	0.55	0.55	-0.49	-0.80	0.82	0.98	0.80	1				
B6	0.38	0.38	0.43	0.44	0.15	0.04	0.46	0.49	0.41	0.50	1			
B7	0.19	0.22	0.27	0.27	0.36	0.35	0.23	0.19	0.20	0.20	0.94	1		
B8	0.18	0.21	0.24	0.25	0.35	0.35	0.23	0.19	0.19	0.20	0.94	0.99	1	
B8A	0.15	0.18	0.22	0.23	0.37	0.39	0.19	0.14	0.16	0.16	0.93	1.00	0.99	1

Para el parámetro forestal de volumen, las variables independientes con las que presenta mayor correlación son la edad y las bandas B3 y B5 con valores superiores a 0.5.

Mientras que, para el parámetro forestal de biomasa aérea y biomasa total, las variables independientes con mayor correlación corresponden a la edad, y las bandas B2, B3, B4 y B5 en ambos casos, todas con valores superiores a 0.5.

Los resultados obtenidos de coeficientes de determinación ajustados (R^2 Ajustado) y de los errores cuadráticos medios (ECM) de los mejores modelos generados para estimar cada parámetro forestal de interés se observan en el cuadro 8.

Cuadro 8. Modelos de regresión generados, con sus respectivos estadísticos de ajuste.

Table 8. Regression models generated, with their respective adjustment statistics.

Modelo	R^2		
	β	Valor ajustado	ECM
$Vol = \beta_0 + \beta_1 B2 + \beta_2 B3 + \beta_3 B5 + \beta_4 B6$	β_0	9.93	
	β_1	-1.87	
	β_2	3.66	0.49
	β_3	-1.59	
	β_4	0.12	
$AGB = \beta_0 + \beta_1 Edad + \beta_2 B3 + \beta_3 B4 + \beta_4 B5 + \beta_5 B6 + \beta_6 B8 + \beta_7 B9$	β_0	-	
	β_1	24.83	
	β_2	4.11	
	β_3	0.91	0.71
	β_4	-0.37	
			367.10

	β_4	-0.56		
	β_5	0.40		
	β_6	-0.23		
<hr/>				
	β_0	-		
		108.1		
	β_1	7.18		
	β_2	1.62		
$B_t = \beta_0 + \beta_1 * Edad + \beta_2 B3 + \beta_3 B4 + \beta_4 B5 + \beta_5 B6 + \beta_6 B8$	β_3	-0.59	0.74	939.7
	β_4	-0.97		9
	β_5	0.64		
	β_6	-0.39		

Para el modelo generado para la estimación de volumen se obtuvo un R^2 ajustado de 0.49; lo que significa que las variables independientes explican cerca de un 50% a la variable dependiente. Por otro lado, para los modelos generados para la estimación de biomasa aérea y biomasa total los valores alcanzados fueron de 0.71 y 0.74 respectivamente, lo que significa que las variables independientes de cada modelo explican en un 71% y 74% a la variable dependiente respectiva.

Respecto a la validación de los tres modelos propuestos, el valor de % Sesgo fue de 1.74 para el parámetro forestal de volumen, el cual se encuentra dentro del rango aceptado, mientras que el % Sesgo fue de -7.55 y -13.77 para los parámetros forestales de biomasa

aérea y total respectivamente, los cuales se encuentran fuera del rango aceptable. Sin embargo, para los tres modelos; volumen, biomasa forestal aérea y biomasa forestal total, la prueba de Wilcoxon generó valores superiores al p-valor (0.05) lo que afirmó estadísticamente que los modelos generados no se encuentran sesgados.

Los valores de productividad de las plantaciones de *T. grandis* utilizadas en el presente estudio, en términos de volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y biomasa aérea y biomasa total (ton ha^{-1}) se pueden apreciar en el cuadro 6. Los valores de volumen oscilan entre 109.55 y 267.17 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, dichos valores presentan muy poca variación con los observados para este mismo parámetro, los cuales corresponden a un mínimo de 99.50 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ y un máximo de 302.29 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ como se puede observar en el cuadro 9.

Cuadro 9. Estimados de productividad obtenidos con los modelos generados.

Table 9. Estimates of productivity obtained with the generated models.

Parcela	Volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	Biomasa aérea (ton ha^{-1})	Biomasa total (ton ha^{-1})
1	240.36	119.07	194.17
2	224.42	115.48	194.03
3	208.57	107.39	173.01
4	213.32	118.76	196.18
5	219.42	121.16	193.00
6	244.48	128.60	216.70
7	237.75	116.55	192.11
8	196.12	88.23	144.68
9	226.07	105.94	167.53
10	209.86	104.19	164.51
11	247.96	106.31	156.13
12	223.08	98.38	154.02
13	254.40	113.97	183.65
14	285.95	158.45	246.90
15	186.19	104.93	165.05

Parcela	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	Biomasa aérea (ton ha ⁻¹)	Biomasa total (ton ha ⁻¹)
16	266.31	135.01	232.03
17	195.30	82.81	127.74
18	176.32	58.29	86.43
19	148.46	44.95	67.93
20	267.17	127.85	206.39
21	174.89	80.36	137.13
22	235.66	104.02	163.24
23	207.15	117.92	197.61
24	208.37	115.54	185.96
25	185.53	90.85	153.74
26	208.61	131.66	224.26
27	200.14	124.25	202.13
28	206.16	122.35	197.31
29	112.26	24.48	40.86
30	187.16	70.28	97.18
31	134.68	34.28	52.31
32	159.08	62.72	94.40
33	141.31	50.13	74.30
34	193.37	58.57	89.92
35	109.55	39.71	78.78
36	230.17	105.60	175.52

Por otra parte, los valores de biomasa aérea y biomasa total oscilan entre los 24.48 y 158.45, y entre 40.86 y 246.90 ton ha⁻¹ respectivamente, presentando en ambos casos los valores mínimos y máximos en la misma parcela, dichos valores poseen muy poca variación en cuanto a los valores observados para estos mismos parámetros, los cuales son de 25.60 y 157.03 ton ha⁻¹ y 33.94 y 258.45 ton ha⁻¹ respectivamente.

Por último, en las figuras 18 y 19 se muestra la representación cartográfica generada para cada parámetro forestal estudiado, a partir de los modelos escogidos. En el caso del

volumen, los valores más representativos se encontraron en rangos que van desde los 150 hasta los 300 m³. Mientras que los valores representativos para la biomasa aérea y total rondan entre los 100 a 150 ton y los 150 a 300 ton respectivamente. Estas representaciones gráficas contribuyen al sector forestal, mediante la exposición geoespacial de los recursos disponibles, información que puede ser valiosa a la hora de implementar en un plan de manejo y a la vez, contribuyen al monitoreo constante de las plantaciones forestales en términos de productividad, por medio de la utilización de herramientas de bajo costo.

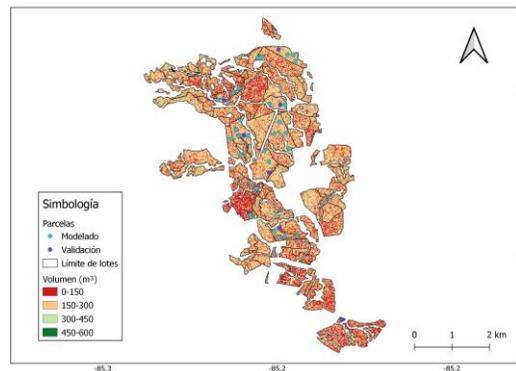


Figura 18. Estimación espacial del volumen (m³) para las plantaciones de *Tectona grandis*, finca Palo Arco, Panamerican Woods, Guanacaste Costa Rica.

Figure 18. Spatial estimation of volume (m³) for *Tectona grandis* plantations, Palo Arco farm, Panamerican Woods, Guanacaste Costa Rica.

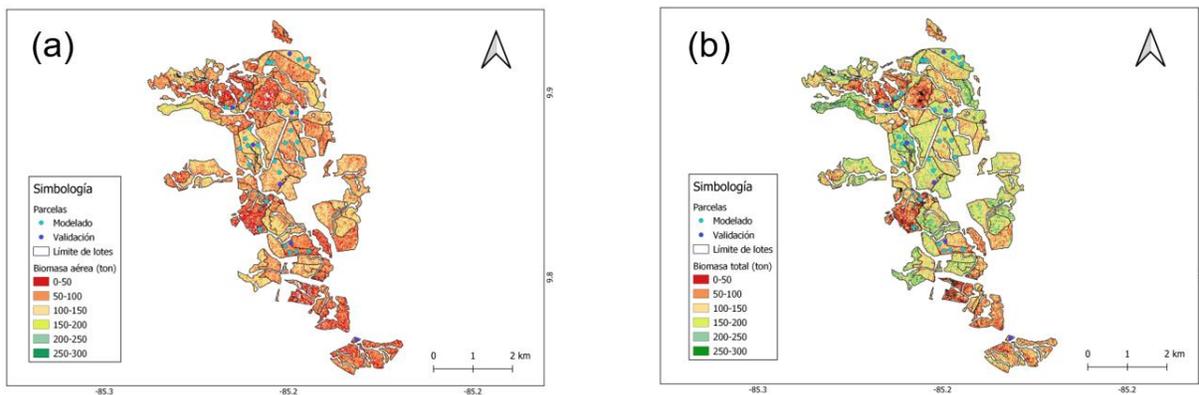


Figura 19. Estimación espacial de la biomasa: (a) aérea y (b) total (ton) para las plantaciones de *Tectona grandis*, finca Palo Arco, Panamerican Woods, Guanacaste Costa Rica.

Figure 19. Spatial estimation of biomass: (a) aerial and (b) total (ton) for *Tectona grandis* plantations, Palo Arco farm, Panamerican Woods, Guanacaste Costa Rica.

12.2.4.1.6 Discusión

Los valores presentados en el cuadro 3, sobre volumen son similares, aunque un poco elevados a los reportados por Dos Reis *et al.*, (2018) en plantaciones de *Eucalyptus* sp., los cuales se encuentran entre 95.80 a 213.85 con un valor medio de 169.34 m³ ha⁻¹, sin embargo, esto puede deberse ya sea a la especie o a los diámetros, ya que los reportados para este estudio oscilan entre los 11.98 cm a los 15.45 cm con valores medios de 14.02 (Dos Reis *et al.*, 2018). Además, López-Serrano *et al.*, (2021), reportan para una cobertura vegetal compuesta por distintas especies de pinos, valores medios de volumen y biomasa 198.04 (m³ ha⁻¹) y 121.68 (Mg ha⁻¹) respectivamente, similares a los obtenidos en el presente estudio. Para rodales de teca con edades mayores a los 5 años, Darmawan y Tsuyuki (2006) reporta valores de biomasa que oscilan entre los 5.8 ton ha⁻¹ y 360 ton ha⁻¹.

Con respecto a la correlación de Pearson presentada en el cuadro 4, Darmawan y Tsuyuki (2006) presenta estudios en los cuales la edad posee una relación leve, pero significativa con los valores de biomasa en plantaciones de teca con R² de 0.29; por otra parte, López-Serrano *et al.*, (2021), también menciona una relación entre el volumen y la biomasa con respecto a la banda B3 superior al 0.5 aunque en su caso negativa para *Pinus* spp. Aunque mucha literatura indica la importancia de los índices de vegetación en la estimación de parámetros forestales, en el presente estudio ese no fue el caso, concordando con Tovar *et al.*, (2020), quien menciona como parte de sus resultados de investigación, que para *E. grandis*, NDVI no fue una variable predictora importante.

Para los valores reportados de R² del modelo generado para el volumen, García-Ramírez *et al.*, (2021) presentó valores por encima de lo obtenido en este estudio, para coberturas vegetales correspondientes a bosques templados. Mientras que, Hernández-Ramos *et al.*, (2020) reportan resultados en modelos matemáticos en diferentes ecosistemas de selvas, tomando como variables independientes parámetros espectrales tomados de Landsat ETM+ e Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) en Quintana Roo, México, con un R² ajustado de 0.32 tanto para volumen como para biomasa.

Por otra parte, Tovar *et al.*, (2020) reportan resultados en modelos de estimación de biomasa para plantaciones de eucalipto a partir de distintas bandas de Sentinel 2, con valores de R^2 ajustado de 0.14 y 0.18. Por último, López-Serrano *et al.*, (2021) reportan valores de R^2 ajustado de 0.59 y 0.58 para volumen ($m^3 ha^{-1}$) y biomasa ($Mg ha^{-1}$) para cobertura vegetal de distintos tipos de pino, cercanos a los obtenidos en el presente estudio.

Por último, con respecto a los valores generados mediante la representación cartográfica para la variable volumen, López Serrano *et al.*, (2021) reportan valores representativos en *Pinus* sp. entre los 100 y 300 m^3 . Mientras que, para la biomasa dicho autor reporta valores representativos, que oscilando entre los 0 y 150 ton, similares a los obtenidos en el presente estudio.

12.2.4.1.7 Conclusiones

Los modelos generados en el presente estudio permitieron estimar de manera indirecta el volumen, la biomasa aérea y total, mediante la información espectral derivada del sensor Sentinel 2A. La edad fue una variable predictora de importancia para la biomasa aérea y total, ya que se encuentra en ambos modelos generados, y jugó un papel de variable indicadora, como era esperado.

Las bandas 3, 5 y 6 fueron variables predictoras importantes en este estudio, ya que estas se encuentran presentes en los tres modelos generados. Contrario a lo que la literatura indica, en este estudio los índices de vegetación no presentaron significancia dentro de los modelos generados.

Para la estimación de volumen ($m^3 ha^{-1}$) se obtuvo el modelo $vol = 9.93 - 1.87 * B2 + 3.66 * B3 - 1.59 * B5 + 0.12 * B6$, con un R^2 ajustado de 0.49.

Para la estimación de la biomasa aérea y total se obtuvieron con un R^2 ajustado de 0.71 y 0.74 respectivamente los modelos:

$$AGB = -24.83 + 4.11 * Edad + 0.91 * B3 - 0.37 * B4 - 0.56 * B5 + 0.40 * B6 - 0.23 * B8A$$

$$B_t = -108.10 + 7.18 * Edad + 1.62 * B3 - 0.59 * B4 - 0.97 * B5 + 0.64 * B6 - 0.39 * B8$$

De acuerdo con la prueba de Wilcoxon los tres modelos desarrollados poseen valores superiores al p-valor (0.05), lo que indica que no poseen sesgo. Los valores estimados tanto en volumen, como en biomasa aérea y biomasa total poseen variaciones muy leves con respecto a los observados. Los modelos generados solo son replicables en sitios con condiciones exactas a las presentadas en este estudio.

Se recomienda ampliar la muestra y distribución geográfica del estudio, para mejorar y generalizar las estimaciones. Los resultados obtenidos muestran una ruta alterna a la estimación de variables forestales orientadas a la productividad de las plantaciones forestales de teca del país y esperamos, de algunas otras especies. La continuidad de este estudio podría sin duda alguna ayudar a las personas productoras e inversionistas forestales a obtener un mecanismo más simplificado en la estimación de la productividad de sus plantaciones y aportar así, en la disminución de sus costos de manejo.

12.2.4.1.8 Contribución de autores

Arleth V. Porras-Granados: Toma de datos de campo, análisis de datos, redacción de documento.

Casia Soto-Montoya: Análisis de datos, revisión de documento.

Dagoberto Arias-Aguilar: Diseño del estudio, Análisis de datos, revisión de documento.

Heileen Aguilar-Arias: Análisis de datos, revisión de documento.

Iván Ávila-Pérez: Toma de datos de campo, redacción y revisión de documento.

Cornelia Miller-Granados: revisión de documento.

12.2.4.1.9 Financiamiento

Esta investigación se llevó a cabo gracias al financiamiento 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 la conservación” de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y el Sistema de Posgrados del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Además del aporte del programa de becas CeNAT-CONARE.

12.2.4.1.10 Agradecimientos

Los autores agradecen al programa de becas CeNAT-CONARE, la colaboración del PRIAS-CeNAT y la empresa Panamerican Woods.

12.2.4.1.11 Referencias bibliográficas

Acosta, M., Pérez, R., Romero, M. E., González, A., & Martínez, L. (2017). Estimación de la densidad forestal mediante imágenes Landsat ETM+ en la región sur del Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(41), 30-55.

Aguirre-Calderón, O. (2015). Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y bosques*, 21(SPE), 17-28. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v21nspe/v21nspea2.pdf>

Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Castellanos-Bolaños, J., de los Santos-Posadas, H., & Etchevers-Barra, J. (2015). Partición de la biomasa aérea en tres especies arbóreas tropicales. *Agrociencia*, 49(3), 299-314.

Arce, H & Barrantes, A. (2006). La madera en Costa Rica: situación actual y perspectivas, FINAFIFO, ONF. 23 p. Recuperado de: <https://onfcr.org/wp-content/uploads/media/uploads/documents/madera-en-costa-rica-situacion-actual-y-perspectivas-2006.pdf>

Berra, E. F., Brandelero, C., Pereira, R. S., Sebem, E., Goergen, L. C. D. G., Benedetti, A. C. P., & Lippert, D. B. (2012). Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. *Ciência Florestal*, 22, 853-864. Recuperado de: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/ZsNq3BKRpMNV3sKQYxQKhNJ/abstract/?lang=pt>

Chávez, J., Abanto-Rodríguez, C., Arévalo; Soria, D., Arévalo, H., Torrejón, G., & da Silva Carmo, I. (2021). Allometric models to estimate the volume of *Guazuma crinita* in forest plantations. *Scientia Agropecuaria*, 12(1). Recuperado de: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/3294/4008>

Chrysafis, I., Mallinis, G., Gitas, I., & Tsakiri-Strati, M. (2017). Estimating Mediterranean Forest parameters using multi seasonal Landsat 8 OLI imagery and an ensemble learning method. *Remote Sensing of Environment*, 199, 154-166. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717303334>

- Comité Nacional de Emergencia (CNE). (1993). Comité Local de Emergencia Nandayure : Plan local de emergencia. Recuperado de: <https://cne.go.cr/CEDO-CRID/CEDO-CRID%20v2.0/CEDO/pdf/spa/doc5210/doc5210-2.pdf>
- Coulston, J., Moisen, G., Wilson, B., Finco, M., Cohen, W., & Brewer, C. (2012). Modeling percent tree canopy cover: A pilot study. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(7), 715-727. doi: 10.14358/PERS.78.7.715
- Darmawan, A., & Tsuyuki, S. (2006). Estimating aboveground teak plantation forest biomass using remotely sensed data in Cianjur, Indonesia. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/345320293_Estimating_aboveground_teak_plantation_forest_biomass_using_remotely_sensed_data_in_Cianjur_Indonesia
- Daryaei, A., & Sohrabi, H. (2016). Additive biomass equations for small diameter trees of temperate mixed deciduous forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31(4), 394-398. Recuperado de: <https://sci-hub.se/10.1080/02827581.2015.1089932>
- De Camino, R., & Morales, J. (2013). Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades. Costa Rica, CATIE, FAO. p. 410. Recuperado de: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2854>
- Dirección de agua. (2019). Proyecto: Implementación de medidas de adaptación del recurso hídrico al cambio climático en los cantones de Nicoya, Hojancha, Nandayure y La Cruz. Programa integral de abastecimiento de agua para Guanacaste-Pacífico Norte. Recuperado de: <https://da.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/Proyecto-Adaptaci%C3%B3n-al-Cambio-Climatico-en-Nicoya-Hojancha-y-Nandayure.pdf>
- Dos Reis., A. A., M. C. Carvalho, J. M. De Mello, L. R. Gomide, A. C. Ferraz F. and F. W. A. Junior. (2018). Spatial prediction of basal area and volume in *Eucalyptus* stands using Landsat TM data: an assessment of prediction methods. *New Zealand Journal of Forestry Science* 48(1): 1-17. Recuperado de: <https://nzjforestryscience.springeropen.com/articles/10.1186/s40490-017-0108-0>
- Fallas-Zúñiga, J. (2017). Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (*Tectona grandis* L. F.) en Costa Rica. (Tesis de maestría). Instituto

Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Recuperado de:
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9240/funciones-alometricas-volumen-crecimiento-para-clones-teca.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Rojas-Vargas, M., & Spínola Parallada, R. M. (2021). Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 143-159. Recuperado de:
<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/14822/20715>

García-Ramírez, P., Domínguez-Calleros, P. A., Corral-Rivas, J. J., Pompa-García, M., Chávez-Simental, J. A., López-Serrano, P. M., & Padilla-Martínez, J. R. (2021). Estimación de volumen forestal mediante imágenes de satélite Landsat 8 OLI en bosques templados mixtos Stand volume estimation using Landsat 8 OLI satellite images in mixed temperate forests. 81 EDICIÓN CUATRIMESTRAL, 28(81). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/journal/674/67466172005/html/>

Gitelson, A., & Merzlyak, M. (1998). Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research*, 22, 689-692. Recuperado de:
[http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01133-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01133-2)

Hernández-Ramos, J., De los Santos-Posadas, H., Valdéz-Lazalde, J., Tamarit-Urías, J., ... & Peduzzi, A. (2017). Estimación del volumen comercial en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* con modelos de volumen total y de razón. *Agrociencia*. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n5/1405-3195-agro-51-05-00561.pdf>

Hernández-Ramos, J., X. García-Cuevas, R. Pérez-Miranda, A. González-Hernández & Martínez-Ángel, L. (2020). Inventario y mapeo de variables forestales mediante sensores remotos en el estado de Quintana Roo, México. *Madera y Bosques* 26(1), e2611884. Recuperado de:
<https://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/e2611884>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2022). Encuesta Nacional Agropecuaria: ENA. 2021. Cultivos forestales. Área sembrada, cosechada, plantas

dispersas y producción. Recuperado de: <https://inec.cr/estadisticas-fuentes/encuestas/encuesta-nacional-agropecuaria?page=2>

Ladrach, W. (2009). Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos, ISTF, (Sociedad Internacional de Forestales Tropicales). Recuperado de: http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_teak/teca.pdf

López-Sánchez, C., García-Ramírez, P., Resl, R., Hernández-Díaz, J., López-Serrano, P. M., & Wehenkel, C. (2017). Modelling dasometric attributes of mixed and uneven-aged forests using Landsat-8 OLI spectral data in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *iForest- Biogeosciences and Forestry*, 10(1), 288-295. doi: 10.3832/ifor1891-009

López-Serrano, P. M., Ramírez-Aldaba, H., Vega-Nieva, D. J., & García, E. (2021). Estimación de parámetros forestales mediante datos de Sentinel 2A en Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 81-106. Recuperado de: <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1075/2754>

Madeiras, R., Nogueira, H., Siqueira, F., & Garcia, H. (2018). Growth and yield of teak stands at different spacing. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(10):1109-1118. Recuperado de: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018001000004>

Martínez, R., Aguirre, O., Vargas, B., Jiménez, J., Treviño, E., & Yamallel, J. (2016). Modeling of biomass and aboveground arboreal carbon in forests of the state of Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(35), 91-105. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v7n35/2007-1132-remcf-7-35-00091.pdf>

Mata, R., Rosales, A., Vásquez, A., & Sandoval, D. (2013). Mapa de Órdenes de Suelos de Costa Rica. 2 ed. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. Esc 1: 200.000. Color. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1630.pdf>

Méndez, J., Turlan, O., Ríos, J., & Nájera, J. (2012). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) MC Johnst.

- Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(13). Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/6091/177afe3d0939e0bd1f1ad97d637db781d0a1.pdf>
- Mora, F., & Hernández, W. (2007). Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el Pacífico de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 101-112. Recuperado de: https://www.mag.go.cr/rev_agr/v31n01_101.pdf
- Moradi, F., Darvishsefat, A. A., Pourrahmati, M. R., Deljouei, A., & Borz, S. A. (2022). Estimating aboveground biomass in dense *Hyrceanian* forests by the use of Sentinel-2 data. *Forests*, 13(1), 104. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/1/104>
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2022). Precios de la madera para las especies más comercializadas. Primer semestre del 2022. Recuperado de: <https://onfcr.org/informe-de-precios-de-madera>
- Pandit, S., Tsuyuki, S., & Dube, T. (2018). Estimating above-ground biomass in subtropical buffer zone community forests, Nepal, using Sentinel 2 data. *Remote Sensing*, 10(4), 601. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/601>
- Pérez, L., & Kanninen, M. (2007). Estimación del volumen comercial a diámetros y alturas variables para *Tectona grandis* L. F. en Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, (49-50). Recuperado de: <http://bco.catie.ac.cr:8087/portal-revistas/index.php/RRNA/article/view/566>
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (pp. 3010–3017). *Greenbelt, MD: NASA SP-351*. Recuperado de: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>
- Solano, D., Vega, C., Eras, V. H., & Cueva, K. (2014). Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador.

CEDAMAZ, 4. Recuperado de:
<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/227/208>

Staben, G., Lucieer, A., & Scarth, P. (2018). Modelling LiDAR derived tree canopy height from Landsat TM, ETM+ and OLI satellite imagery—A machine learning approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 666-681. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243418303970>

Tovar, A. L., Lizarazo, I. A., & Rodríguez, N. (2020). Estimación de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* y *Pinus* spp. usando imágenes Sentinel1A y Sentinel2A en Colombia. *Colombia forestal*, 23(1), 79-93. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/journal/4239/423964386006/html/>

Trisasonko, B. H., & Paull, D. (2018). A review of remote sensing applications in tropical forestry with a particular emphasis in the plantation sector. *Geocarto International*, (September), 1-23. Recuperado de: <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1516245>

Wilson, B., Knight, J. & McRoberts, R. (2018). Harmonic regression of Landsat time series for modeling attributes from national forest inventory data. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137, 29-46. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271618300066>

Zhang, N., Chen, M., Yang, F., Yang, C., Yang, P., Gao, Y., ... & Peng, D. (2022). Forest Height Mapping Using Feature Selection and Machine Learning by Integrating 4434. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/18/4434>

12.2.5 Resultados del tercer artículo del producto 1: Comparación de herramientas tecnológicas para determinar índices de vegetación en plantaciones de *Tectona grandis*, Guanacaste, Costa Rica

A continuación, se presenta este nuevo artículo que ya está listo para el proceso de publicación. En esta sección se transcribe el artículo completo tal y como fue enviado a la revista.

COMPARACIÓN DE HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA
DETERMINAR ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN PLANTACIONES DE
Tectona grandis, GUANACASTE, COSTA RICA

COMPARISON OF TECHNOLOGICAL TOOLS TO DETERMINE VEGETATION
INDICES IN *Tectona grandis* PLANTATIONS, GUANACASTE, COSTA RICA

Arleth V. Porras-Granados, Casia Soto-Montoya, Dagoberto Arias-Aguilar, Heileen
Aguilar-Arias, David Romero-Badilla

12.2.5.1.1 Resumen

Para el adecuado manejo del recurso forestal es necesario disponer de información confiable y a bajo costo sobre variables del rodal, en este sentido es de especial importancia el uso de nuevas y adecuadas herramientas. Con el desarrollo de las tecnologías satelitales, espectroradiómetros y más recientemente los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) con cámaras especializadas se pueden estimar y utilizar distintos parámetros, entre estos los índices de vegetación, como el NDVI y el GNDVI, como herramientas útiles en el monitoreo de la vegetación, especialmente en zonas de difícil acceso o de grandes extensiones. Con el propósito de comparar las diferentes tecnologías para obtener los índices NDVI y GNDVI, que incluyen un espectroradiómetro de campo UniSpec SC, imágenes satelitales Sentinel-2 y productos fotogramétricos del RPAS Phantom 4 multiespectral, se llevó a cabo un estudio en una plantación de *Tectona grandis* en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, mediante un diseño experimental completamente aleatorio con 20 parcelas de observación y localizadas en el terreno mediante una estación total GNSS. El NDVI no presentó diferencias entre los valores obtenidos a partir de

imágenes satelitales y los obtenidos en campo; sin embargo, sí mostró diferencias entre los datos de campos y los valores obtenidos con el RPAS, siendo estos últimos los valores más bajos. El GNDVI mostró diferencias significativas entre los diferentes métodos estudiados, siendo los valores obtenidos con los RPAS los más bajos y los obtenidos con la imagen satelital los más altos. Se recomienda el uso de las imágenes Sentinel-2 para la estimación de los índices de vegetación y se brindan recomendaciones sobre los aspectos a mejorar con el uso de los RPAS.

Palabras claves: Sentinel-2, RPAS, espectroradiómetro

12.2.5.1.2 Abstract

For the proper management of forest resources, it is necessary to have reliable and low-cost information on stand variables; in this sense, the use of new and adequate tools is of special importance. With the development of satellite technologies, spectroradiometers and more recently Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) with specialized cameras, different parameters can be estimated and used, including vegetation indices, such as NDVI and GNDVI, as useful tools. in the monitoring of the vegetation, especially in areas of difficult access or large extensions. With the purpose of comparing the different technologies to obtain the NDVI and GNDVI indices, which include a UniSpec SC field spectroradiometer, Sentinel-2 satellite images and photogrammetric products of the multispectral RPAS Phantom 4, a study was carried out in a *Tectona grandis* plantation in the province of Guanacaste, Costa Rica, using a completely randomized experimental design with 20 observation plots and located on the ground using a GNSS total station. The NDVI did not present differences between the values obtained from satellite images and those obtained in the field; however, it did show differences between the field data and the values obtained with the RPAS, the latter being the lowest values. The GNDVI showed significant differences between the different methods studied, being the values obtained with the RPAS the lowest and those obtained with the satellite image the highest. The use of Sentinel-2 images is recommended for the estimation of vegetation indices and recommendations are provided on aspects to improve with the use of RPAS.

Keywords: Sentinel-2, RPAS, spectroradiometer.

12.2.5.1.3 Introducción

La adecuada valoración de la vegetación como recurso natural estratégico requiere de un conocimiento exhaustivo y de disponer de las herramientas adecuadas para su monitoreo (Hassan *et al.*, 2019). Se debe tomar en cuenta que, la respuesta de la vegetación es un importante indicador para evaluar diferentes procesos biofísicos y fisiológicos en los ecosistemas; como, por ejemplo, los fenómenos relacionados a la pérdida de biodiversidad, desertificación, relación entre la vegetación y erosión del suelo e interacción vegetación-clima (Flores *et al.*, 2020).

Los índices de vegetación son una herramienta muy útil y versátil en el monitoreo del estado de la vegetación (Luna *et al.*, 2020; Mandal *et al.*, 2020); en específico, en zonas de difícil acceso o de grandes extensiones (Rhyma *et al.*, 2020). De forma genérica, se podría definir un índice de vegetación como un parámetro calculado a partir de la reflectividad de estructuras de la planta, a distintas longitudes de onda (Gilabert *et al.*, 1997 & Muñoz, 2013).

De acuerdo con Shahuang *et al.* (2021), uno de los índices más utilizados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), que se destaca por su capacidad para evaluar el estado de la cobertura vegetal, estimar propiedades de la vegetación y productividad en un ecosistema; así como, indicar estrés vegetativo. Asimismo, existen otros índices como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI, por sus siglas en inglés), el cual, es una variante del NDVI que utiliza la longitud de onda de la banda verde en lugar de la banda del rojo. Ambos índices han sido ampliamente utilizados como indicadores comunes para evaluar la salud, densidad de la vegetación en un área determinada, estado de la productividad entre otros (Corti *et al.*, 2019, Duré & Vanessa, 2019, Lima-Cueto *et al.*, 2019, Moreno & Salgado, 2019, Kim *et al.*, 2021 y Villatoro *et al.*, 2022).

Existen distintas técnicas destructivas y no destructivas utilizadas para la obtención de los índices de vegetación, como lo son las aplicaciones por medio de la teledetección y la

instrumentación in situ. En este contexto, la teledetección ha sido determinante en la evaluación de las fluctuaciones en la distribución, productividad y estructura de los ecosistemas (Lechner *et al.*, 2020), destacando su aplicación en las dinámicas del cambio de uso del suelo y coberturas vegetales (Gonzalez, 2015). Las imágenes generadas mediante la tecnología de espectralradiómetros, cámaras, drones y satélites brindan no solamente mayor cantidad de observaciones sobre las coberturas del suelo; sino que también, permiten la detección de características de la vegetación que no pueden detectarse a simple vista (Esperanza & Zerda, 2002). Aunque se debe tener en cuenta, que se encuentra condicionado al alcance, en su mayoría en el caso de los sensores disponibles de manera gratuita, con limitaciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes disponibles (García-Cervigón & José, 2015).

Por otro lado, los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés) se han utilizado en los últimos años como una nueva plataforma versátil para la adquisición de imágenes remotas con multitud de aplicaciones en cartografía, termografía y agricultura de precisión (García-Martínez *et al.*, 2020). Algunas desventajas de los productos fotogramétricos obtenidos de los RPAS respecto a las imágenes satelitales son: una menor resolución espectral y una menor área de cobertura por unidad de superficie (García-Cervigón & José, 2015). Por otro lado, de acuerdo con Koh y Wich (2012), los RPAS aportan información precisa y detallada, con una alta resolución espacial, lo que los posiciona como una herramienta de gran utilidad en el sector forestal. Los efectos del mercado asociados a la oferta y demanda de estos equipos han hecho que sean más accesibles, e inclusive se ha llegado a considerar que se pueden adquirir a un bajo costo en comparación con otras tecnologías, causando así un ahorro en mano de obra, dinero y tiempo. Según Aguilar y Herrera (2016), los costos de los RPAS varían según los modelos de hélices, las diferentes capacidades de carga; así como, por las posibilidades de instalación de sensores y otros componentes. Sin embargo, en temas de costo, aunque bien pueden considerarse más baratos que algunas otras tecnologías, este no es el caso al compararlo con imágenes satelitales de libre acceso, como lo son los datos de la familia de sensores Sentinel.

Por otro lado, dentro de las técnicas que permiten estudiar el comportamiento de la vegetación se encuentra la espectroradiometría, a través de la utilización de espectroradiómetros de campo, que pueden medir directamente valores de reflectancia de la superficie de la hoja, permitiendo obtener información más detallada y multipropósito (Bedoya & Rendón, 2014). Sin embargo, al comparar su aplicabilidad y rentabilidad con las alternativas anteriores, esta requiere de un mayor esfuerzo físico y de campo, mano de obra altamente calificada y la disponibilidad de los equipos especializados, lo que se traduce en un alza considerable en los costos de utilización.

Debido a las diferentes ventajas y desventajas entre las distintas tecnologías mencionadas, y la importancia de los índices de vegetación para el monitoreo y la toma de decisiones sobre mantenimiento de plantaciones forestales, este estudio busca comparar los valores de índices NDVI y GNDVI generados mediante el uso de diferentes tecnologías multi e hiperespectrales como lo son los datos multiespectrales disponibles de las imágenes satelitales del sensor Sentinel-2, los productos fotogramétricos obtenidos de los RPAS con cámara multiespectral y las firmas hiperespectrales obtenidas con un espectroradiómetro de campo. Para ello se seleccionaron plantaciones de *Tectona grandis* ubicadas en Guanacaste, Costa Rica, con la finalidad de facilitar este tipo de análisis al sector forestal y recomendar cual es la mejor herramienta.

12.2.5.1.4 Materiales y métodos

12.2.5.1.4.1 Área de estudio y descripción de condiciones de la plantación

El estudio se realizó en la finca Palo Arco (1481 ha), propiedad de la empresa forestal Panamerican Woods, ubicada en Nandayure, Guanacaste, Costa Rica (-85.268, 9.798, -85.209, 9.879, 11 msnm). La misma se encontraba cubierta por plantaciones de *Tectona grandis* con edades de 1 hasta 16 años y una red de 660 parcelas permanentes establecidas por la empresa. Se localiza dentro de la zona de vida Bosque Tropical muy Húmedo (Fernández-Moya *et al.*, 2014), y se identifica por poseer una temperatura media anual de 27°C y una precipitación media anual de 1888 mm (Fonseca-González *et al.*, 2021).

12.2.5.1.4.2 *Diseño experimental*

Se utilizó un diseño completamente aleatorio, con un total de 20 unidades de observación, que en este caso fueron parcelas cuadradas de 0,36 ha con un tamaño de 60 x 60 metros. Para la ubicación más precisa de las parcelas, éstas fueron localizadas mediante un equipo móvil GNSS multicanal en campo.

La variable en estudio correspondió a los índices de vegetación NDVI y GNDVI, mientras que los tratamientos experimentales utilizados fueron distintos instrumentos y sensores de obtención de los datos multi e hiperespectrales necesarios para calcular los índices de vegetación. Los tratamientos y su codificación se muestran en el cuadro 10.

Cuadro 10. Codificación de los tratamientos experimentales.

Código de tratamiento	Tratamiento
T1	Espectroradiómetro (UniSpec SC, testigo)
T2	Imagen satelital (Sentinel-2 nivel 2A)
T3	Vehículo aéreo no tripulado (P4 Multiespectral – DJI)

12.2.5.1.4.3 *Adquisición de datos*

La adquisición de los datos fue realizada en los meses de noviembre y diciembre del año 2021. Debido a la logística en la adquisición de los datos se presentaron algunas diferencias en sus periodos de medición, en el siguiente cuadro se muestra el cronograma de mediciones.

Cuadro 11. Cronograma de adquisición de datos.

Parcelas	Tratamiento	Fecha de adquisición	Hora de medición
21 y 22	RPAS	09 de noviembre del 2021	15:50 a 16:55
	Sentinel-2	09 de noviembre del 2021	16:05
	UniSpec	24 de noviembre del 2021	11:01 a 13:12
30, 31, 32, 33, 34 y 35	RPAS	10 de noviembre del 2021	8:31 a 11:33
	Sentinel-2	09 de noviembre del 2021	16:05
	UniSpec	16 y 19 de noviembre del 2021	11:37 a 17:53
5, 7, 8, 9, 26 y 27	RPAS	10 de noviembre del 2021	13:27 a 16:45
	Sentinel-2	09 de noviembre del 2021	16:05
	UniSpec	18 y 23 de noviembre del 2021	11:48 a 16:35
4, 6, 10 y 13	RPAS	02 de diciembre del 2021	14:21 a 16:18
	Sentinel-2	04 de diciembre del 2021	16:06
	UniSpec	23 y 25 de noviembre del 2021	11:33 a 17:43
1 y 3	RPAS	03 de diciembre del 2021	08:18
	Sentinel-2	04 de diciembre del 2021	16:06
	UniSpec	17 de noviembre del 2021	12:20 a 13:41

Debido a los periodos de medición, se utilizaron dos imágenes satelitales Sentinel-2 nivel 2A, las cuales de acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) (s.f) son imágenes “corregidas atmosféricamente e incluye la corrección de la dispersión de las moléculas de aire, de los efectos de absorción y dispersión de los gases atmosféricos, en particular el ozono, el oxígeno y el vapor de agua y la corrección de la absorción y la dispersión debida a aerosoles”. Dichas imágenes fueron la S2B_MSIL2A_20211109T160459_N0301_R097_T16PFR_20211109T204306.SAFE y la S2A_MSIL2A_20211204T160641_N0301_R097_T16PFR_20211204T203122.SAFE estas fueron descargadas de manera gratuita de la plataforma de la Agencia Espacial Europea.

12.2.5.1.4.4 Obtención de ortomosaicos con imágenes del RPAS

Los vuelos fotogramétricos se realizaron con un RPAS DJI Phantom 4 Multiespectral previamente calibrado según indicaciones del manual de usuario. Se realizaron vuelos programados para cubrir los diferentes lotes del área de estudio en donde se encontraban las parcelas de muestreo. Dichos vuelos fueron elaborados con la aplicación DJI GS Pro, con la

siguiente configuración: 70 m de altura de vuelo, 75% de traslape vertical, 65% de traslape horizontal.

El procesamiento de las imágenes de los vuelos para la obtención de ortomosaicos fue realizado en estaciones de alto rendimiento con un sistema operativo Windows 64 bit, 32 GB de memoria RAM, un procesador Intel ® Core™ i7-10700K, con dos tarjetas gráficas GeForce RTX SUPER, y como software de fotogrametría se empleó Agisoft Metashape 1.8.1. Para un procesamiento semi-automatizado se desarrolló un flujo por lotes (batch process), el cual consistía en los siguientes procesos: alineación de fotografías, optimización de alineamiento, creación de nube densa de puntos, creación del modelo de elevación digital y generación del ortomosaico. La calibración de reflectancia en las fotografías se realizó con el sensor de sol integrado en la aeronave. Como resultado se obtuvieron mosaicos multispectrales con cinco bandas a saber: banda azul (1), banda verde (2), banda roja (3), banda Red Edge (4) y banda infrarrojo cercano (5).

12.2.5.1.4.5 Toma de datos con sensor in situ

Se seleccionaron los tres árboles más representativos de cada parcela, tomando en cuenta el diámetro medio de la parcela, se procedió a seleccionar de cada uno de estos árboles, cinco hojas, siguiendo la metodología de Ramírez-Mesén (2019), a las cuales se les midió y promedió el valor de reflectancia a través de las firmas espectrales. Para esto se utilizó el espectroradiómetro UniSpec SC el cual mide en una longitud de onda de 310 a 1100 nm (VIS/NIR), y fue previamente calibrado según el manual de usuario. Para la selección de las hojas de cada árbol se siguió la metodología propuesta por Murillo *et al.*, (2014) las hojas que se utilizaron fueron debidamente seleccionadas para que no presentaran imperfecciones y fueron tomadas de la parte superior de la copa expuesta al sol, se recolectaron de la porción distal o media de la rama y fueron medidas inmediatamente al ser cortadas.

12.2.5.1.4.6 Obtención de índices de vegetación.

Para los ortomosaicos generados de las fotografías aéreas del RPAS y la imagen satelital, los índices de vegetación se obtuvieron mediante la calculadora ráster del programa QGIS 3.16.16, utilizando las siguientes ecuaciones (Cuadro 12).

Cuadro 12. Índices de vegetación calculados y sus ecuaciones correspondientes.

Índice de vegetación	Ecuación	Referencia
NDVI	$(\text{NIR-Red})/(\text{NIR+Red})$	(Rouse, Haas, Schell & Deering, 1974)
GNDVI	$(\text{NIR-Verde})/(\text{NIR+Verde})$	(Gitelson & Merzlyak, 1998)

Posterior a esto se extrajo el promedio del índice para cada parcela, utilizando una capa vectorial de las parcelas en estudio y la herramienta “Estadísticas de zona del programa QGIS 3.16.16”. Para calcular los índices de vegetación medidos con el UniSpec SC (2702 archivos), se creó un código en el lenguaje de programación Python. De las 247 filas de cada archivo, correspondientes a la medida de la reflectancia en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, se programó calcular los índices NDVI y GNDVI, con las bandas más cercanas en longitud a las bandas de Sentinel-2.

Debido al tamaño de resolución de la imagen satelital y el RPAS utilizado, el número de muestras utilizadas para el promedio de los índices de vegetación fue de un aproximado de 36 con la imagen satelital Sentinel-2 y un aproximado de 4 000 000 para el RPAS.

12.2.5.1.4.7 Análisis estadístico

Se inició con una exploración general de los datos para detectar alguna inconsistencia, seguido por la verificación de supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas, debido a que los datos no poseían una distribución normal y no se logró una transformación satisfactoria de la variable, se procedió a realizar un análisis no paramétrico mediante la prueba de Kruskal Wallis con una comparación por pares para determinar las diferencias estadísticas entre los índices de vegetación obtenidos en cada tratamiento, el análisis fue realizado bajo un alfa de 0,05 y se obtuvieron con el programa estadístico Infostat®.

12.2.5.1.5 Resultados y discusión

El análisis estadístico mediante gráficos BoxPlot que se observa en la figura 20, indica que para el NDVI los valores entre el T1 y T2 son muy similares entre sí; sin embargo, el T3 es

completamente distinto, tanto en distribución y ampliación del rango de valores como en variación de los datos.

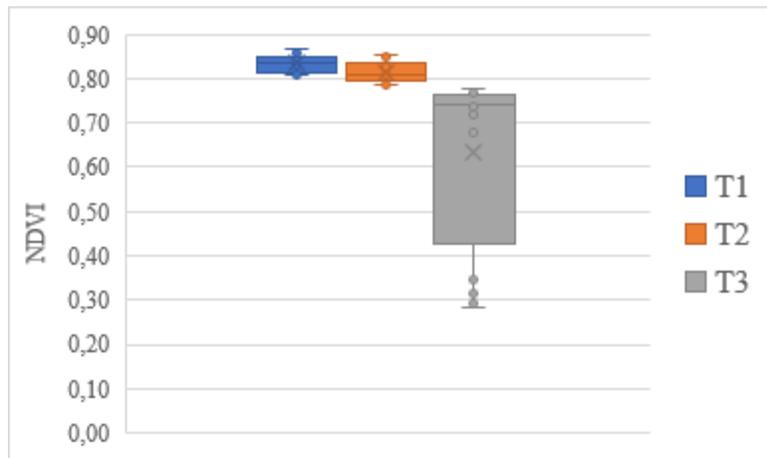


Figura 20. Box plot de valores de NDVI por tratamiento.

Por otra parte, de acuerdo con la figura 21, para el GNDVI, las diferencias entre los tratamientos aumentan, aunque aún se sigue manteniendo el mismo comportamiento en donde el T3 presenta una mayor ampliación del rango de valores y variación de los datos.

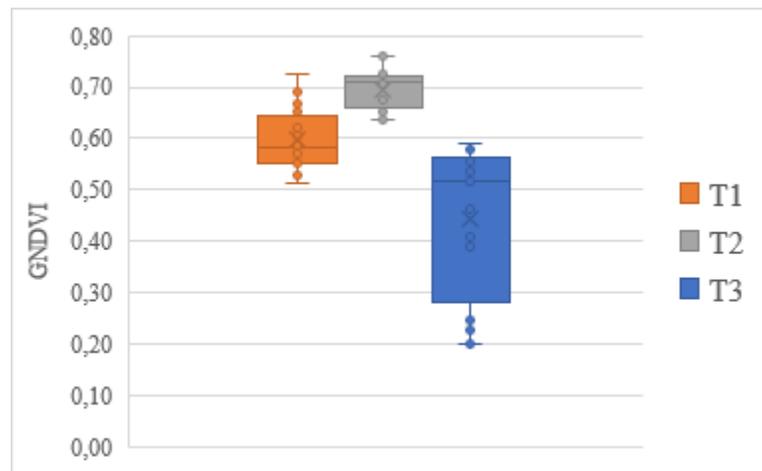


Figura 21. Box plot de valores de GNDVI por tratamiento.

Cuadro 13. Resultados de índices obtenidos.

Parcela	UniSpec		Imagen Satelital		Dron	
	NDVI	GNDVI	NDVI	GNDVI	NDVI	GNDVI

Parcela	UniSpec		Imagen Satelital		Dron	
	NDVI	GNDVI	NDVI	GNDVI	NDVI	GNDVI
1	0,87	0,72	0,80	0,72	0,74	0,56
3	0,81	0,53	0,81	0,71	0,74	0,55
4	0,84	0,63	0,80	0,68	0,69	0,39
5	0,82	0,55	0,79	0,67	0,28	0,20
6	0,81	0,51	0,79	0,66	0,68	0,41
7	0,81	0,54	0,81	0,67	0,35	0,23
8	0,81	0,57	0,79	0,64	0,29	0,20
9	0,82	0,54	0,79	0,65	0,31	0,21
10	0,81	0,55	0,83	0,71	0,78	0,56
13	0,86	0,68	0,80	0,65	0,72	0,46
21	0,85	0,59	0,79	0,64	0,68	0,42
22	0,83	0,57	0,82	0,68	0,74	0,52
26	0,84	0,62	0,81	0,71	0,30	0,25
27	0,83	0,60	0,82	0,72	0,76	0,52
30	0,84	0,61	0,84	0,72	0,77	0,56
31	0,84	0,55	0,85	0,76	0,75	0,57
32	0,85	0,65	0,85	0,74	0,77	0,56
33	0,84	0,58	0,85	0,76	0,77	0,59
34	0,85	0,67	0,83	0,73	0,77	0,58
35	0,86	0,69	0,83	0,72	0,74	0,54

Los valores del NDVI que se presentan en el cuadro 13, se destacan por concordar con lo observado en la figura 20, en donde los valores de NDVI para los tratamientos T1 y T2 son cercanos, teniendo así T1 los valores más altos y también, se observa que los valores de T3 se encuentran por debajo de T1 y T2, ostentando estos una amplitud más pronunciada; ya que, para T1 los valores máximos y mínimos corresponden a 0,87 y 0,81 (amplitud de 6 unidades), mientras que para el T2 son de 0,85 y 0,79 (6 unidades) y para el T3 son de 0,77 y 0,28 (49 unidades) correspondientemente.

Por otra parte, los valores de GNDVI presentados en el cuadro 13, recalcan que los valores más altos de este índice, los posee el T2 con un valor de 0,76, seguido del T1 con 0,72 y por último el T3 con 0,59. Situación que también se corrobora en la figura 21.

La prueba de Kruskal Wallis indicó que existe al menos un tratamiento diferente en ambos índices de vegetación estudiados, lo que se puede observar en el cuadro 10, en donde se muestra que, para ambos índices de vegetación, el p-valor es inferior al nivel de significancia establecido (0,05).

Cuadro 14. Resultados de ANDEVA y valores promedio de los índices de vegetación estudiados por tratamiento, con sus respectivas diferencias.

Índice	p-valor	Tratamiento	Promedio del índice*
NDVI	<0,0001	T1	0,83 ^A
		T2	0,82 ^A
		T3	0,63 ^B
GNDVI	<0,0001	T1	0,60 ^A
		T2	0,70 ^B
		T3	0,44 ^C

* Las letras que se ubican al lado del valor medio de los índices de vegetación indican la diferencia estadística significativa entre tratamientos, tratamientos con letras iguales no poseen diferencias entre sí y viceversa.

El análisis estadístico evidenció las diferencias encontradas por tratamientos para cada uno de los índices estudiados, acentuando lo mostrado en las figuras 20 y 21, así como en el cuadro 14. Para el NDVI no se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos T1 y T2, pero si, entre estos y el T3, mostrando así los valores promedios más altos en el T1 y los más bajos en el T3, los valores obtenidos para este índice mediante las tecnología del espectroradiómetro UniSpec e imagen satelital Sentinel-2 fueron de 0,83 y 0,82 respectivamente, cercanos a los reportados para sensores remotos, en coberturas boscosas sin detallar, más específicamente para Sentinel por los autores Huang *et al.*, (2021), los cuales eran de aproximadamente de 0,8.

Por otra parte, para el GNDVI se presentaron diferencias estadísticas entre los tres tratamientos, reportando los valores más altos en el T2 y los más bajos T3. El valor obtenido para el GNDVI mediante la tecnología de RPAS fue de 0,44 cercano a los reportados con esta misma tecnología por García (2018) para cultivos de arroz, los cuales oscilan entre 0,2 y 0,45 y por Revelo *et al.*, (2020) para el cultivo de café (*Coffea arabica*) en donde un grupo de datos oscilaron entre 0 y 0,4.

Los valores bajos obtenidos mediante el RPAS, en ambos índices pueden deberse a algunos problemas presentados durante el procesamiento de la información por la falta de puntos de control o bien, a la falta de calibración de la cámara, previo al sobrevuelo. Gómez y Mayorga (2020), recomiendan una calibración previa y además mencionan la importancia de la utilización de puntos de control y calibración mediante una estación GNSS (Rivera, 2016 & Castro, 2020), para así no caer en la falta de aplicación de los principios técnicos adecuados para obtener distancias de las fotografías tomadas y evitar problemas con el procesamiento futuro.

Las diferencias encontradas entre los valores de NDVI y GNDVI, obtenidos del RPAS y de la imagen satelital, pueden deberse también a la exactitud y precisión de las tecnologías utilizadas, ya que cada una posee una resolución distinta, y por ende un número de muestras distintas para el cálculo de los promedios de los índices de vegetación. Para el caso del RPAS la resolución espacial fue de 3 centímetros, mientras que para la imagen satelital fue de 10 metros, lo que en parcelas de 3600 m² equivalen a un n=36 para la

imagen satelital, mientras que para el RPAS corresponde a un $n= 4\ 000\ 000$. Lo mencionado se puede apreciar claramente en la figura 22.

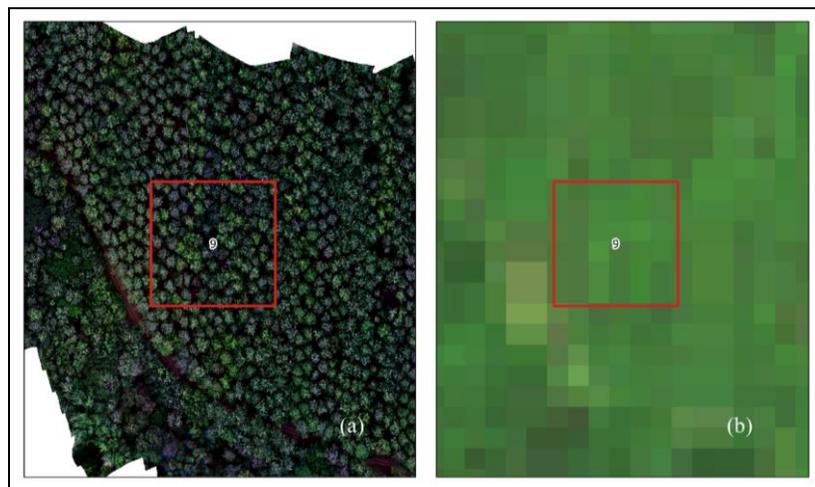


Figura 22. Diferencias visuales de un ortomosaico RGB obtenido mediante un RPAS (a) y uno obtenido a través de una imagen satelital Sentinel-2 (b).

Los valores bajos en ambos índices de vegetación obtenidos mediante el uso del RPAS, además de poder deberse a la exactitud y precisión de las imágenes según la tecnología de adquisición, como se evidencia en la figura 6, también pueden tener efecto del estado fenológico de la plantación, la cual se encontraba en etapa de floración en los meses de medición. Esto coincidiría con los autores Shen *et al.*, (2009), quienes encontraron que, a mayor cobertura de floración, menor es el NDVI, resultados obtenidos mediante un estudio de campo, utilizando el espectroradiómetro MS-720, en *Halerpestes tricuspis* bajo distintos niveles de floración. Además, Zheng *et al.*, (2021), también mencionan que los “radiómetros e instrumentación de imágenes infrarrojas adolecen de los inconvenientes de los efectos de floración”.

Por otra parte, con el espectroradiómetro de campo utilizado, se toma la medición directamente en la hoja, por lo tanto, las medidas no son afectadas por el estado fenológico, salvo condiciones de contenidos de clorofila diferentes por la condición fenológica. Además, otros autores han encontrado problemas en los resultados obtenidos en el NDVI y GNDVI de ortomosaicos creados a partir de fotografías de RPAS, como es el caso de la autora Ramírez (2019) quien encontró que los índices de vegetación que utilizan la banda

infrarroja alcanzaron valores más altos con respecto a los basados en bandas del espectro visible, no obstante, los ortomosaicos del NDVI y GNDVI presentaron problemas.

Los índices de vegetación, como el NDVI y el GNDVI, pueden proporcionar información valiosa sobre la salud de la vegetación y el crecimiento de las plantas en una plantación forestal. Esto puede ayudar a los gerentes de la plantación a tomar decisiones de manejo informadas, como la selección de áreas de plantación, la determinación de la cantidad adecuada de fertilizantes y la identificación de áreas que requieren tratamiento para controlar plagas y enfermedades (Latifi *et al.*, 2015, Singh *et al.*, 2018, Yan *et al.*, 2018 y Aparecido y Rudke, 2019).

12.2.5.1.6 Conclusiones

El NDVI no presentó diferencias entre los valores obtenidos de la imagen satelital y los obtenidos en campo, sin embargo, sí mostró diferencias entre estos y los valores obtenidos con el RPAS, siendo estos últimos los valores más bajos.

El GNDVI mostró diferencias significativas entre los tres tratamientos estudiados, siendo los valores obtenidos del RPAS los más bajos y los obtenidos con la imagen satelital los más altos.

Se recomienda estudiar los índices de vegetación en distintas etapas fenológicas de la plantación, esto debido a que la reflectancia de las flores afecta a algunos índices de vegetación, en las respuestas espectrales esperadas y dependiendo del instrumento que se utilice, la comparación de estos presenta una amplia variación.

Se sugiere al trabajar con imágenes de RPAS aplicar una máscara al suelo o delimitar las áreas de copa para así asegurarse que los cálculos de índices se están haciendo específicamente sobre la vegetación y que los valores sean más comparables con los obtenidos mediante otras herramientas.

No se encontró diferencias en el NDVI calculado con el espectroradiómetro manual y el calculado con Sentinel-2. Por lo tanto, se recomienda el uso de Sentinel-2 lo cual ahorra recursos, debido a que no se compra equipo especializado ni se gasta en su mantenimiento, además no es necesario ir al campo a tomar las mediciones .

No se recomienda, tomar los datos con el vehículo aéreo no tripulado (P4 Multiespectral – DJI), bajo las condiciones y configuración utilizada en este estudio, debido a que los resultados distan ampliamente a los obtenidos con el espectroradiómetro manual y con Sentinel-2, siendo los primeros los valores más cercanos a la reflectancia real de la vegetación, pues son medidos directamente en las hojas. La planificación y procesamiento de los datos con esta tecnología es costosa y compleja, los datos deberían ser calibrados con una estación GNSS, con puntos de control en el campo, lo cual aumenta el costo.

Debido a que los metadatos de las imágenes satelitales Sentinel-2 poseen un peso considerable, para la descarga se recomienda contar con una conexión a internet estable y buena, crear previamente una cuenta en la página de COPERNICUS y tener espacio de almacenamiento en el ordenador. También se puede utilizar Google Earth Engine y hacer el procesamiento sin necesidad de invertir en equipo especializado.

12.2.5.1.7 Agradecimientos

Esta investigación fue parte del proyecto de investigación “Implementación de tecnologías y aplicaciones de bajo costo para el estudio de la fisiología de especies arbóreas del trópico mesoamericano como herramienta para la conservación”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) y al Sistema de Posgrados del Instituto Tecnológico de Costa Rica, como parte del trabajo de tesis de la Maestría en Ciencias Forestales de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

A Panamerican Woods y sus funcionarios por ser parte del equipo de trabajo y brindaros el apoyo, las herramientas e insumos de trabajo necesarios.

Al programa de becas CeNAT-CONARE y al equipo de trabajo del PRIAS por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

12.2.5.1.8 Referencias bibliográficas

Aguilar, L & Herrera, J. (2016). Evaluación de bosques tropicales mediante el uso de tecnología VANT. Revista Germinar, n° 19, pp. 14-15. Recuperado de: https://issuu.com/ciagro/docs/germinar_no_20

- Aparecido, L.M.T & Rudke, A.P. (2019). The use of remote sensing for forest management: A review. *Forest Ecology and Management*, 432, 209-221. doi:10.1016/j.foreco.2018.09.051
- Bedoya Duque, H. A., & Rendón Valencia, J. L. (2014). Modelación del contenido de clorofila basado en la reflectancia medida por espectrorradiometría de campo en caña de azúcar [Tesis de grado no publicada]. Universidad del Valle. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/10074/CB-0519957.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro, A. (2020). Drones: configuración de vuelos y generación de modelos 3D. Recuperado de: <http://repositorio.inictel-uni.edu.pe:8080/xmlui/handle/123456789/60>
- Corti, M; Cavalli, D; Cabassi, G; Vigoni, A; Degano, L & Marino, P. (2019). Application of a low-cost camera on a UAV to estimate maize nitrogen-related variables. *Precision Agriculture*, 20, 675-696. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-018-9609-y>
- Duré, A & Vanessa, K. (2019). Análisis de la relación entre el carbono orgánico del suelo y los valores de los índices NDVI y SAVI en sistemas productivos, distrito de San Pedro del Ycuamanduyu (Tesis de Maestría). Recuperado de: <https://repositorio.conacyt.gov.py/handle/20.500.14066/3950>
- Esperanza, F. & Zerda, H. (2002). Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago del Estero. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Flavio-Speranza-2/publication/337907941_Potencialidad_de_los_indices_de_vegetacion_para_la_discriminacion_de_coberturas_forestales/links/5df22fe592851c83647661c3/Potencialidad-de-los-indices-de-vegetacion-para-la-discriminacion-de-coberturas-forestales.pdf

- European Space Agency (ESA). (s.f). Sentinel: User guide Sentinel-2 level 2A. Recuperado de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types/level-2a>
- Fernández-Moya, J., Alvarado, A., Morales, M., San Miguel-Ayanz, A. & Marchamalo-Sacristán, M. (2014). Using multivariate analysis of soil fertility as a tool for forest fertilization planning. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 98(2), 155–167. doi:10.1007/s10705-014-9603-3
- Flores, D. D. C., Benítez, E. A. C., Sánchez, Y. F. Ávila, D. D. (2020). Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba. *Ecosistemas*, 29(1), 1885-1885. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>
- García, D. A. (2019). Dinámica de los índices de vegetación NDVI, GNDVI Y GVI en un cultivo de arroz a partir de imágenes aéreas multiespectrales tomadas por drones. Tesis de Maestría. Recuperado de: <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/4603>
- García-Cervigón, D. & José, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión [Tesis de doctorado no publicada]. Universidad Complutense de Madrid.
- García-Martínez, H., Flores-Magdaleno, H., Khalil-Gardezi, A., Ascencio-Hernández, R., Tijerina-Chávez, L., Vázquez-Peña, M. A., & Mancilla-Villa, O. R. (2020). Estimación de la fracción de cobertura de la vegetación en maíz (*Zea mays*) mediante imágenes digitales tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(4), 399-399.
- Gilbert, M. A., González-Piqueras, J. & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(1), 1-10. https://www.researchgate.net/profile/Ma-Gilbert/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion/links/00b7d5187635eb5a1a000000/Acerca-de-los-indices-de-

vegetacion.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail

- Gitelson, A. & Merzlyak, M. (1998). Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research*, 22, 689-692. Recuperado de: [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)01133-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01133-2)
- Gómez, E & Mayorga, S. (2020). Manual de topografía aplicado a la recolección y procesamiento de datos tomados con drones en procesos forenses. Recuperado de: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/26318>
- González, C. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *CEDAMAZ*, 5(1), 30-41.
- Hasan, S. S., Zhang, Y., Chu, X., & Teng, Y. (2019). The role of big data in China's sustainable forest management. *Forestry Economics Review*, 1(1), 96-105. DOI 10.1108/FER-04-2019-0013
- Huang, S; Tang, L; Hupy, J. P; Wang, Y & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Kim, E. J; Nam, S. H; Koo, J. W & Hwang, T. M. (2021). Hybrid approach of Unmanned Aerial Vehicle and Unmanned Surface Vehicle for assessment of chlorophyll-a imagery using spectral indices in Stream, South Korea. *Water*, 13(14), 1930. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/14/1930>
- Koh, L. P., & Wich, S. A. (2012). Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. *Tropical conservation science*, 5(2), 121-132. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/310404552_Dawn_of_Drone_Ecology_Low-Cost_Autonomous_Aerial_Vehicles_for_Conservation

- Latifi, H; Galos, B & Kohler, M. (2015). Canopy nitrogen mapping in a mixed temperate forest using hyperspectral imagery and LiDAR data. *Remote Sensing*, 7(1), 715-734. doi:10.3390/rs70100715
- Lechner, A. M., Foody, G. M., & Boyd, D. S. (2020). Applications in remote sensing to forest ecology and management. *One Earth*, 2(5), 405-412. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>
- Lima-Cueto, F. J; Blanco-Sepúlveda, R; Gómez-Moreno, M. L & Galacho-Jiménez, F. B. (2019). Using vegetation indices and a UAV imaging platform to quantify the density of vegetation ground cover in olive groves (*Olea Europaea L.*) in Southern Spain. *Remote Sensing*, 11(21), 2564. Recuperado de: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/21/2564?type=check_update&version=1&utm_source=TrendMD&utm_medium=cpc&utm_campaign=Remote_Sens_TrendMD
- Luna, D. R., Manzano, J. M., Montoya-Bonilla, B. P., & García, J. H. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 298-312. <http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.2.628>
- Mandal, D; Kumar, V; Ratha, D; Dey, S; Bhattacharya, A; Lopez-Sanchez, J. M; ... & Rao, Y. S. (2020). Dual polarimetric radar vegetation index for crop growth monitoring using sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111954. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111954>
- Moreno, A., & Salgado, E. (2019). Análisis de cultivo de maíz para ensilaje utilizando imágenes desde un UAV. Repositorio Institucional. Universidad de Manizales. Recuperado de: <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/3406>
- Muñoz Aguayo, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/327558326_Apuntes_de_Teledeteccion_Indices_de_vegetacion

- Murillo, R; Alvarado A & Verjans, J. (2014). Concentración foliar de nutrimentos en plantaciones de teca en la cuenca del canal de Panamá., *Agronomía Costarricense*, vol. 38, nº 1, pp. 11-28.
- Ramírez-Mesén, C. 2019. 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.
- Revelo, D; Mejía, J; Montoya-Bonilla, B. P; & Hoyos, J. (2020). Análisis de los índices de vegetación NDVI, GNDVI y NDRE para la caracterización del cultivo de café (*Coffea arabica*). *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 298-312. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612020000200298
- Rhyma, P. P., Norizah, K., Hamdan, O., Faridah-Hanum, I., & Zulfa, A. W. (2020). Integration of normalised different vegetation index and Soil-Adjusted Vegetation Index for mangrove vegetation delineation. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100280.
- Rivera, J. (2016). Evaluación de Método de Corrección Geométrica de Fotografía Aérea escala 1: 1.000 capturada por vehículos aéreos no tripulados estableciendo una red Geodésica de cuarto orden (Master's thesis, Universidad del Azuay). Recuperado de: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/5768>
- Rouse, J; Haas, R; Schell, J & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1*
- Shen, M; Chen, J; Zhu, X & Tang, Y. (2009). Yellow flowers can decrease NDVI and EVI values: Evidence from a field experiment in an alpine meadow. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(2), 99-106. Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5589/m09-003>

Singh, P.K; Kushwaha, S.P.S & Singh, V.P. (2018). Remote sensing applications in forestry: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(1), 3060-3069. doi:10.20546/ijcmas.2018.701.365

Symposium (pp. 3010–3017). Greenbelt, MD: NASA SP-351. Recuperado de: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>

Villatoro, B; Barrera, C; Tagua, K & Marroquín, S. (2022). Uso de índice de vegetación NDVI como herramienta para realizar mapas de productividad de TCH en caña de azúcar. CENGICANA: Memoria Presentación de resultados de investigación Zafra. Recuperado de: <https://cengicana.org/files/2022072714591310.pdf>

Yan, K; Wang, J; Zhao, C & Li, Q. (2018). Forest health status assessment using Sentinel-2A imagery and machine learning algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 510-521. doi:10.1016/j.jag.2018.08.006

Zheng, Y; Tang, L & Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129488. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621036672>

12.2.6 Ampliación y producto 2 del OE2: Análisis de la función de la hoja desde la biomimética a través de los mecanismos y las estrategias estáticas para comprender mejor su interacción con la luz y las futuras aplicaciones en el diseño ecológico. Beca CENAT.

Este producto incluido en la ampliación del proyecto considera el grupo de actividades que forman parte de una beca CENAT que no ha concluido y que representó una contrapartida externa de cerca de 3 millones de colones. Toda la fase de campo que incluye la realización de un taller de presentación de los resultados, ya fue ejecutada al 100%. Todavía se está en la etapa de elaboración de al menos 2 publicaciones. La razón de no disponer todavía los borradores de publicaciones es por motivo de procesamiento de datos y que se está a la espera de los últimos resultados de laboratorio. A continuación, se presenta un informe de lo ejecutado.

12.2.6.1 “Estudio de la biomimética de las hojas y la reflectancia en especies del trópico Informe de Proyecto de Investigación”

12.2.6.1.1 Elaboración y presentación de propuesta al PRIAS-CeNAT

Se trabajó en una propuesta de investigación titulada “Estudio de la biomimética de las hojas y la reflectancia en especies del trópico” para ser sometida al concurso de becas CeNAT-CONARE 2021-2022. Dicha propuesta fue preseleccionada como candidata, por lo cual se coordinó y efectuó una presentación de la propuesta el día viernes 12 febrero en la cual participaron virtualmente partes del Laboratorio PRIAS, Laboratorio ECOPLANT y el becario.

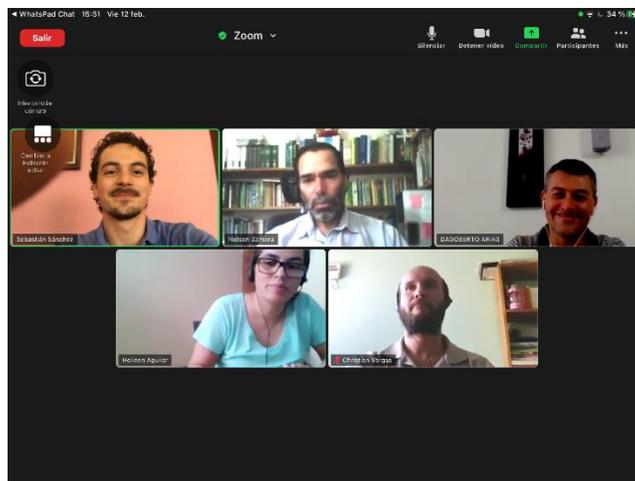


Figura 1. Reunión de presentación de propuesta. Participantes de izq-der y arriba-abajo: Sebastián Sánchez (becario), Nelson Zamora (asesor), Dagoberto Arias (tutor), Heileen Aguilar (encargada de la investigación en PRIAS), y Christian Vargas (encargado del programa de becas CeNAT-CONARE en PRIAS).

12.2.6.2 Primera Etapa. Inicio del proyecto + Investigación bibliográfica May-Ago 2021

El día miércoles 26 de mayo 2021 fue oficialmente notificada la aprobación de la beca CENAT, vía correo electrónico, dando como inicio al proyecto de colaboración ECOPLANT-PRIAS mediante una inducción al programa de becas CeNAT-CONARE el día martes 08 de junio 2021. El becario Sebastián Sanchez es estudiante regular de la Escuela de Diseño Industrial y planteó el tema del estudio de la biomimética, con la claridad que su formación en aspectos biológicos, botánicos y forestales eran totalmente nuevos y eso también significó un gran reto.

Como parte de los requisitos de inicio, se coordinó y concretó una reunión de acompañamiento científico-técnico del TEC-PRIAS con participación del becario Sebastián Sánchez, el tutor Dagoberto Arias (ECOPLANT) y la investigadora Heileen Aguilar del (PRIAS).

Durante los meses de Jun-Ago 2021, el becario realizó una investigación bibliográfica guiada por el tutor y la investigadora del PRIAS, lo cual derivó en el marco teórico base para futuras publicaciones. Dicho trabajo permitió al becario adentrarse en la teoría sobre anatomía y fisiología vegetal así como en los fenómenos de reflexión de luz, los mecanismos de adaptación foliar a la luz y en el estudio de firmas hiperespectrales foliares.

Durante esta etapa el becario ha estado sujeto a la presentación de informes mensuales a la FUNCeNAT y revisados y validados por el tutor, para garantizar el avance de la beca.

12.2.6.3 Segunda Etapa. Recolección de Datos Set 2021-Dic 2022

Esta etapa consistió en la planeación y ejecución de seis giras de campo (abajo detalladas) así como del trabajo realizado en el Laboratorio de Patología Vegetal (Escuela de Ingeniería Forestal) y en el Laboratorio Institucional de Microscopía Electrónica (TEC). La meta fue adquirir buenas imágenes de las estructuras externas de las hojas de las 10 especies estudiadas

Previo a las giras de campo, se coordinó la metodología de muestreo con la colaboración importante del tutor y del equipo de investigadores del proyecto, en particular del asesor Ing, Nelson Zamora (ECOPLANT, TEC), la Ing. María Rodríguez (TEC) y de la investigadora Heileen Aguilar (PRIAS).



Figura 2. Coordinación de metodología de muestreo para giras de campo. Participantes presenciales de izq-der: Sebastián Sánchez (becario), Heileen Aguilar (encargada de la investigación en PRIAS) y María Fernanda Obando (investigadora PRIAS). Participantes vía remota: Dagoberto Arias (tutor) y Nelson Zamora(asesor) (ECOPLANT, TEC).

Las giras de campo consistieron en diferentes visitas del equipo de investigadores y asistentes con el becario-PRIAS-TEC a varios sitios de muestreo dentro del Gran Área Metropolitana (G.A.M.). Se tomaron diferentes mediciones con instrumentos y se recolectaron muestras de hojas de diez especies de árboles para la medición de firmas hiperespectrales y rasgos fisiológicos. En esta etapa fue fundamental el apoyo recibido por la institución y por la Escuela de Ingeniería Forestal cubriendo los gastos de transporte.

- **GIRA 1: 09 Set 2021 - Parque Metropolitano La Sabana**



Figura 3. Equipo de gira 1. Participantes de izq-der: Heileen Aguilar (encargada de la investigación en PRIAS), Cornelia Miller (directora PRIAS), María Fernanda Obando (investigadora PRIAS), Carlos Ballesteros (conductor colaborador de Esc. Ing. Forestal), Nelson Zamora (asesor de beca), y Sebastián Sánchez (becario).

- **GIRA 2: 23 Set 2021 - Parque Metropolitano La Sabana**



Figura 4. Equipo de gira 2. Participantes de izq-der: Heileen Aguilar (encargada de la investigación en PRIAS, Sebastián Sánchez (becario), David Romero (investigador PRIAS), y Nelson Zamora (asesor de beca TEC). Colaboró un conductor de la Unidad de Transportes TEC.

- **GIRA 3: 10 Oct 2022 - Parque Ecológico Santo Domingo de Heredia**



Figura 5. Equipo de gira 3. Participantes de izq-der: Heileen Aguilar (encargada de la investigación en PRIAS, Nelson Zamora (asesor de beca), David Romero (investigador PRIAS) y Sebastián Sánchez (becario). Colaboró un conductor de la Unidad de Transportes TEC.



Figura 6. Nelson Zamora (asesor de beca) cortando ramas de hojas a muestrear; Sebastián Sánchez (becario) tomó la fotografía. Ambos bajaron hojas para medir su clorofila con uso de uso de clorofilómetro SPAD, marcaron puntos GPS, y documentaron la gira y especies muestreadas con cámara digital.



Figura 7. De izq-der: Heileen Aguilar (investigadora PRIAS), Nelson Zamora (asesor de beca) y Sebastián Sánchez (becario) recolectando hojas a muestrear.



Figura 8. David Romero (investigador PRIAS) tomando datos de firmas hiperespectrales de hojas, recolectadas por Nelson y Sebastián, mediante el uso de un espectroradiómetro de campo ASD Handheld 2 y su Plant Probe y clip para plantas.



Figura 9. Heileen Aguilar (investigadora PRIAS) tomando fotografías de hojas, recolectadas por Nelson y Sebastián, mediante el uso de cámara digital.

- **GIRA 4: 01 Feb 2022 - Centro de Conservación Santa Ana**



Figura 10. David Romero y Heileen Aguilar (investigadores PRIAS) tomando de firmas hiperespectrales y fotografías de hojas, recolectadas por Nelson y Sebastián.



Figura 11. Nelson y Sebastián recolectando hojas de especies desde los árboles para medir su clorofila, marcando puntos GPS y documentando la gira y especies muestreadas.

- **GIRA 5: 07 Feb 2022 - Centro de Conservación Santa Ana**



Figura 12. Equipo de gira 5. Participantes de izq-der: Heileen Aguilar (encargada de la investigación en PRIAS, David Romero (investigador PRIAS), Sebastián Sánchez (becario) y

Nelson Zamora (asesor de beca). El vehículo fue aportado por el PRIAS y conducido por la investigadora Heileen.



Figura 13. Sebastián Sánchez (becario) junto a árbol de Aceituno que muestreó.

- **GIRA 6: 01 Set 2022 - Centro de Conservación Santa Ana**



Figura 14. Discusión de rasgos característicos de cada especie, liderada por Nelson Zamora (asesor beca, TEC). De izq-der: Participantes de izq-der: Fernando Cabezas (Investigador Centro Conservación Santa Ana), Sebastián Sánchez (becario), Dagoberto Arias (tutor beca ECOPLANT), Nicole Aguilar (asistente ECOPLANT, colaboradora en esta gira y en fase de procesamiento de datos); y Nelson Zamora (asesor de beca Esc. Ing. Forestal TEC).



Figura 15. Discusión de rasgos característicos de cada especie, liderada por Nelson Zamora (asesor beca, TEC) y Dagoberto Arias (tutor beca). Participantes de izq-der: Hanzel León (asistente ECOPLANT, colaborador en esta gira y en fase de procesamiento de datos), Fernando Cabezas (Investigador Centro Conservación Santa Ana, Dagoberto Arias (tutor beca ECOPLANT), Nelson Zamora (asesor de beca Esc. Ing. Forestal TEC), Nicole Aguilar (asistente ECOPLANT, colaboradora en esta gira y en fase de procesamiento de datos); abajo Sebastián Sánchez (becario).



Figura 16. Nelson Zamora (asesor beca, TEC) y Sebastián Sánchez (becario) recolectan muestras de hojas y discuten los métodos de adaptación de las hojas ante la luz solar.

12.2.6.3.1 Estudio de Nutrición Foliar: Set 2021-Feb 2022

Se contrató, mediante financiamiento de la beca CeNAT-CONARE, el servicio de estudio de nutrición foliar al INTA-MAG. Hojas recolectadas en las giras fueron trasladadas hasta las instalaciones de dicha dependencia estatal localizadas en Ochomogo, Cartago, y los resultados fueron recibidos vía correo digital.

ID Laboratorio		ID Campo	Provincia	Cantón	Distrito	Cultivo	Servicios	Observaciones
22021401		01- Anterob- Suva				BUAYABA	LSF-12 foliar	
22021402		02- Anmyba- Balsamo				BUAYABA	LSF-12 foliar	
22021403		03- Ansamsa- Ewisaro				BUAYABA	LSF-12 foliar	
22021404		04- Ansmgl- Acetituno				BUAYABA	LSF-12 foliar	
22021405		05- Anastgr- Ron Ron				BUAYABA	LSF-12 foliar	

Análisis químico completo por muestra de tejidos vegetales (Ca, Mg, K, P, Fe, Zn, Cu, Mn, B, S)												
Código análisis: LSF-12 Tipo de muestra: foliar		Total de muestras procesadas: 5										
Nº Lab.	Identificación de campo	%						mg/Kg				
		N-T	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
S-22021401	01- Anterob- Suva	3.79	0.17	1.11	1.81	0.35	0.20	216.51	9.42	16.77	35.76	58.21
S-22021402	02- Anmyba- Balsamo	3.10	0.16	1.26	2.10	0.27	0.22	236.99	7.36	22.28	28.31	56.03
S-22021403	03- Ansamsa- Ewisaro	3.60	0.10	0.66	0.61	0.09	0.21	303.58	6.88	10.01	29.94	38.08
S-22021404	04- Ansmgl- Acetituno	1.63	0.11	0.92	0.87	0.24	0.15	336.47	2.63	13.95	23.34	23.58
S-22021405	05- Anastgr- Ron Ron	1.90	0.14	0.84	0.91	0.23	0.15	115.66	4.80	10.46	8.91	14.94

Figura 17. Reporte de resultado de un estudio nutricional realizado por el INTA-MAG.

12.2.6.3.2 Trabajo en Laboratorio de Patología Vegetal, Esc. Ingeniería Forestal: Mayo 2022

Con la colaboración de la Ing. María Rodríguez y del sr. Carlos Ballestero, en coordinación con el tutor, el estudiante recibió una inducción para utilizar el microscopio óptico Nikon Eclipse E200 para el estudio de estomas y tricomas a nivel micro. Tras la experimentación con diversas técnicas de preparación para el microscopio de muestras de las hojas, tanto al becario como tutor pudieron confirmar que para profundizar el entendimiento del valor funcional de estas estructuras se necesitaba del microscopio electrónico para lograr visualizar apropiadamente nuevos detalles de las estructuras.



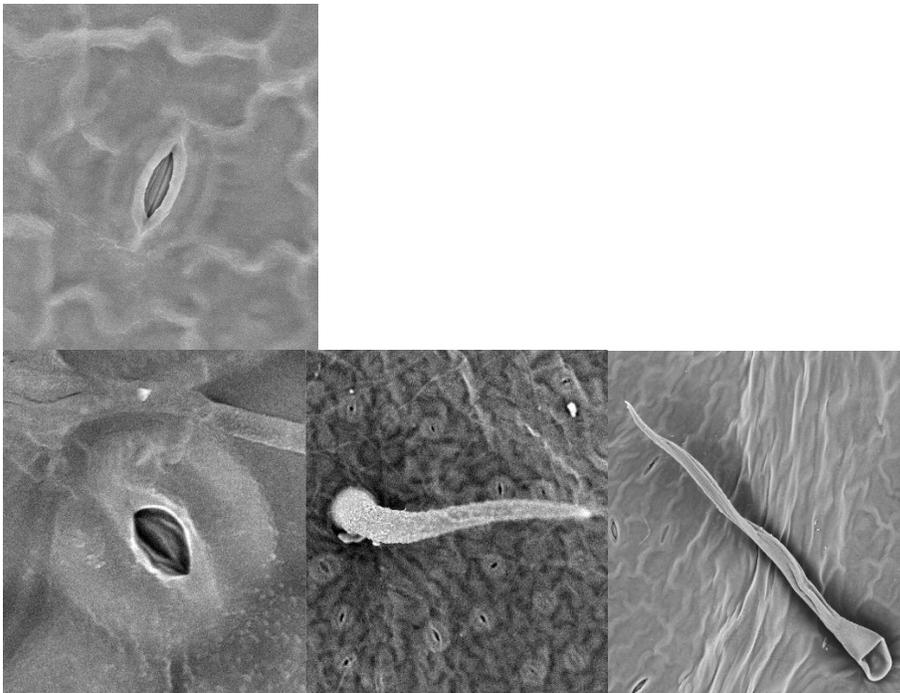
Figuras 18 y 19. Izquierda: Sebastián (becario) preparando muestras para visualizar en microscopio óptico. Derecha: fotografía de la técnica para lograr un corte transversal de hoja sujetándola mediante un trozo de zanahoria.



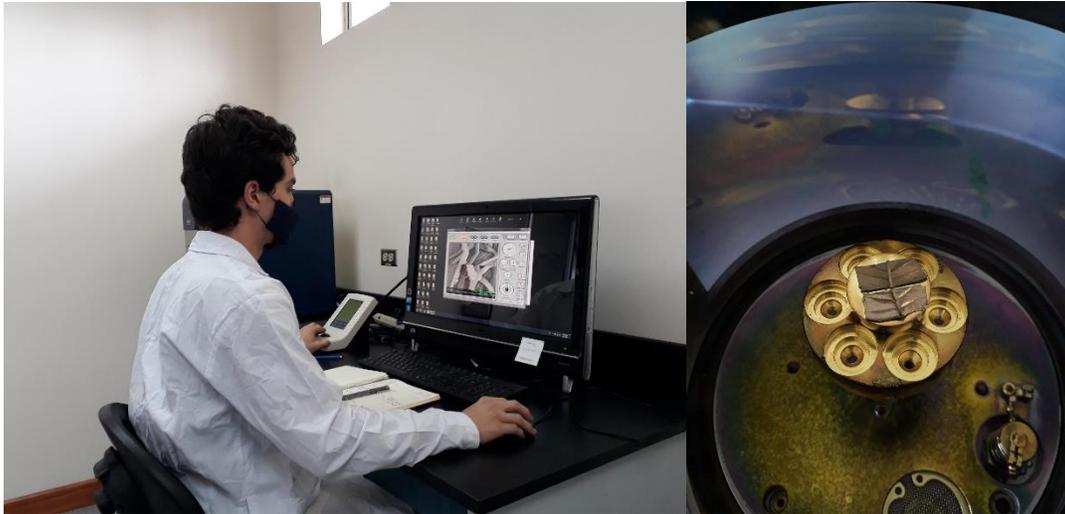
Figuras 20 y 21. Izquierda: Sebastián (becario) logrando observar estomas, más sin lograr la definición esperada debido a limitaciones tecnológicas del microscopio. Derecha: Dagoberto (tutor) y Sebastián (becario) posando frente a la primera fotografía de estomas con una resolución apropiada.

12.2.6.3.3 Trabajo en Laboratorio de Microscopía Electrónica TEC: Set - Oct 2022

Gracias a la colaboración del investigador biotecnólogo del CIB Ing. Randall Chacón fue posible hacer uso de las facilidades que ofrece el Laboratorio de Microscopía Electrónica del TEC que permitió usar el microscopio electrónico de barrido Hitachi TM-3000 para visualizar los estomas y tricomas, dando como resultado una serie de fotografías de alta resolución y calidad, donde se observan con claridad dichas estructuras, que se ejemplifican a continuación:



Figuras 22, 23, 24 y 25. Fotografías de estomas (2 izquierdas) y tricomas (2 derechas) de especies en estudio, tomadas por Sebastián Sánchez (becario).



Figuras 26 y 27. Izquierda: Sebastián Sánchez (becario) utilizando el microscopio SEM Hitachi TM-3000 en Laboratorio Institucional de Microscopía Electrónica TEC; derecha: muestra de hoja con aplicación de baño de plasma y recubrimiento de oro-paladio como parte de la técnica de preparación de las muestras.

12.2.6.3.4 Recolección de datos en colaboración con asistentes ECOPLANT: Set - Nov 2022

Gracias a la colaboración de la mayoría de los investigadores así como los asistentes del Laboratorio ECOPLANT Hanzel León, Nicole Aguilar, Andrés Arroyo y Andrés Villalta, todos estudiantes de Ing. Forestal, en conjunto con el becario Sebastián y el tutor Dagoberto fue posible recolectar todos los datos de fisiología de las especies, pesos y áreas foliares.



Detalles de las campañas de medición para colecta de muestras y mediciones completas de variables



Figura 28. Izquierda: Hojas preparadas de las diez especies en estudio para secado en horno como parte del método de cálculo de pesos foliares, mediante la colaboración de los asistentes del Laboratorio ECOPLANT.



Figuras 29 y 30. Izquierda: Cocinado de hojas en solución de soda cáustica como parte del método de cálculo de esqueleto foliar; derecha: hojas resultado del proceso de cocinado donde permanece solamente el esqueleto de venación foliar; ambas mediante la colaboración de los asistentes del Laboratorio ECOPLANT.

12.2.6.4 Tercera Etapa. Procesamiento y análisis de datos Junio-Dic 2022

Durante la segunda mitad del año 2022 Sebastián (becario) y Dagoberto (tutor) como equipo sistematizaron toda la información en bases de datos y desarrollaron el procesamiento previo y análisis de información de los datos recolectados durante los meses anteriores. Se dispone de bases de datos depuradas de las firmas hiperespectrales, pesos y áreas foliares, estomas y tricomas foliares. Los estudios de pigmentos fotosintéticos ya fueron procesados con ayuda de los investigadores del CIB y se está trabajando en una publicación científica muy especializada que involucra a investigadores del CIB, estudiante de maestría y también investigadores de la UCR. Se espera publicar estos resultados en el segundo semestre del 2023.



Figuras 31 y 32. Sebastián Sánchez (becario) y Dagoberto Arias (tutor) como equipo en la labor de procesamiento y análisis de datos.

12.2.6.5 Cuarta Etapa. Taller de Co-Ideación Dic 2022

Durante el mes de diciembre del 2022, el becario Sebastián Sanchez, con el apoyo de la investigadora Heileen Aguilar (PRIAS) y de su tutor Dagoberto Arias (ECOPLANT) organizaron y ejecutaron un evento que se llevó a cabo el 06 de diciembre del 2022 titulado “*Taller de Co-Ideación, Biomimética de Árboles Tropicales*”.

El Taller de Co-Ideación partió de la intención de diseñar un espacio para co-crear soluciones tecnológicas a partir de conocimientos generados en la investigación, es decir, aplicando el principio biomimético de abstracción “*desde la biología a la tecnología*”. Para este cometido, el becario Sebastián Sánchez diseñó infografías con los datos procesados en los meses anteriores en conjunto con el equipo de investigadores del proyecto, como material de insumo a los participantes para imaginar y construir sus propuestas de soluciones biomiméticas basadas en la naturaleza. Los detalles de los logros del taller se detallan en el siguiente apartado.

12.2.6.6 Quinta Etapa. Documentación y desarrollo de publicaciones científicas /2023

La última etapa de esta amplia investigación corresponde a publicar artículos científicos derivados de los descubrimientos logrados.

El primer artículo en desarrollo trata sobre el tema de caracterización de la pigmentación foliar en 10 especies de árboles. Se tiene un nivel de avance del 80% y será una publicación entre investigadores y estudiantes del TEC y la UCR.

El segundo artículo en desarrollo trata sobre la caracterización de las diez especies arbóreas en estudio según sus rasgos ecológicos y cómo influyen en la adaptación foliar a la luz. Dada la cantidad de información se tiene un avance del 50% con respecto a un borrador de artículo.

Además, se han aportado muestras en el Herbario de la Escuela de Ingeniería Forestal y en el Museo Nacional y se han suministrado fotografías de las seis especies estudiadas durante la investigación para uso en la plataforma virtual PlantNet.

Asimismo, se ha contribuido a la conceptualización de un proyecto nuevo que trata de una biblioteca país sobre los datos validados de ecofisiología, imágenes y firmas hiperespectrales de hojas y maderas de Costa Rica y que pueda ser manejado desde en TEC en convenio con el PRIAS un registro en la biblioteca de firmas espectrales del laboratorio PRIAS de las diez especies estudiadas.

Por último, se incluye dentro de esta etapa el desarrollo de este informe como parte de la documentación de esta investigación.

12.2.7 Ampliación y producto 3 del OE2: Caracterización de un grupo de especies maderables bajo amenaza de extinción por medio visión artificial y el uso del Xylotron (actividades conjuntas con el Servicio Forestal de Estados Unidos). Convenio USFS/IP-FUNDATEC.

12.2.7.1 Resumen de los resultados obtenidos sobre colectas de especies y preparación de muestras

Con la ampliación del proyecto se incorporaron nuevas actividades mediante la firma de un convenio marco entre el TEC y el Servicio Forestal de Estados Unidos USFS/IP por medio de Management and Engineering Technologies International (METI) Inc., y seguidamente se estableció un contrato con la FUNDATEC para administrar nuevos recursos financieros externos (6.500 dólares americanos) y complementar el trabajo de campo para la toma de muestras botánicas y de procesamiento de muestras de madera, siguiendo la metodología definida y que consideró las siguientes especies del Apéndice II de CITES: *Dalbergia retusa*, *Dipterix panamensis*, *Cedrela odorata* y *Cedrela tonduzi*.

El TEC recibió en condición de donación, un equipo XyloTron nuevo y valorado en \$4000 que fue entregado en un acto organizado por la embajada de Estados Unidos y recibido por la Dra. Floria Roa en calidad de representante de las autoridades del TEC (figura 23).



Figura 23. Detalle de la entrega de equipo Xylotron por parte de la Embajada de Estados Unidos.

Para este informe es importante considerar el envío de las muestras botánicas a Kew Gardens (llegaron en la primera semana de febrero 2022) y posteriormente el envío de las muestras de madera a la Universidad de Washington (recibidas por el Dr. Peter Kitin el día 11 de mayo del 2022).

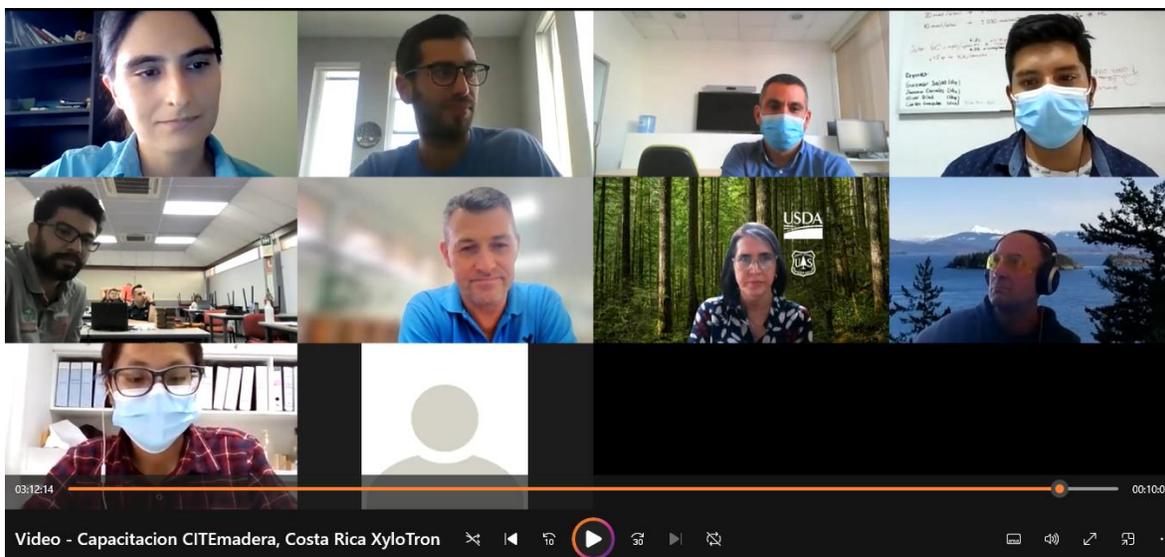


Muestra colectada de *Dipteryx panamensis*, fuste de *Dipteryx panamensis* y flores de *Dalbergia retusa*. (fotos, M. Castillo, 2021)



Foto de envío de muestras al jardín botánico Kew Garden en Reino Unido

Se realizó una jornada de capacitación el día 19 de abril del 2002 para el grupo de investigadores del TEC donde se recibió una capacitación virtual denominada “Taller sobre el uso del dispositivo de visión artificial XyloTron” con la participación de expositores: Javier Ramos Ulloa, Deysi Noemí Martínez Zorrilla, José Alfredo Ugarte Oliva (todos de CITEMadera de Perú) y Maria Antonieta Rivas Leclair, Eric Rosenfield, John Hermanson (del Servicio Forestal de Estados Unidos).

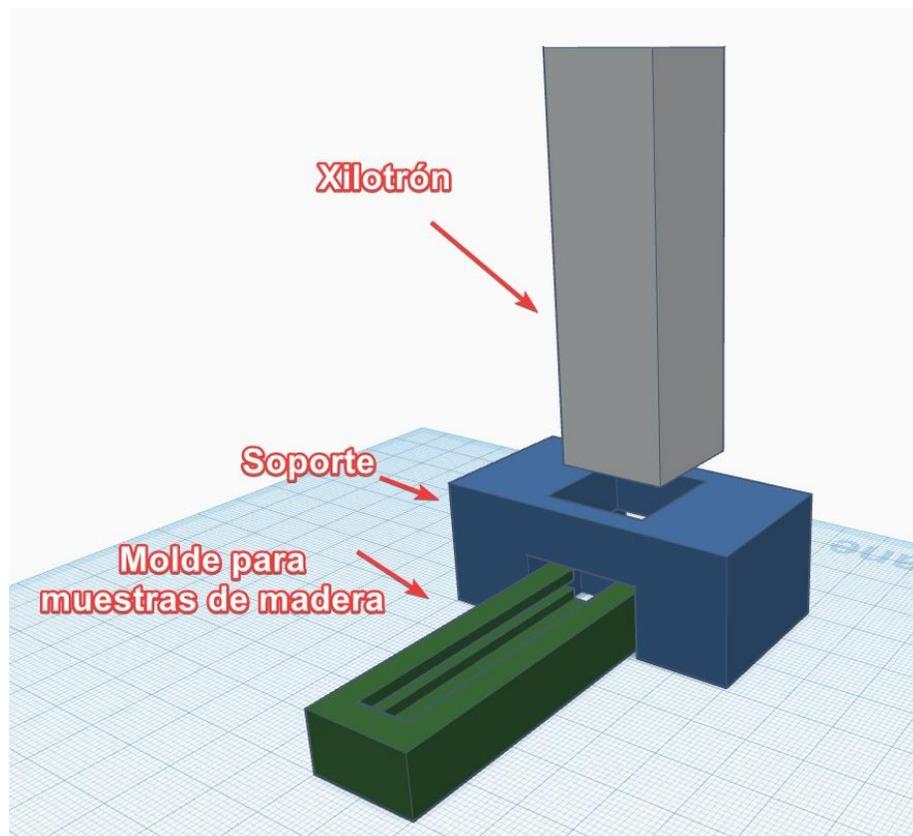


Sobre el trabajo desarrollado en los laboratorios del TEC, se ensayaron diferentes técnicas y herramientas para trabajar en la preparación de las muestras. El proyecto generó una cantidad de cilindros de madera (más de 500) que se deben manipular cuidadosamente, para lo cual se completaron las siguientes actividades:

- Consecución del personal encargado de preparación (estudiantes asistentes)
- Entrenamiento en uso de herramientas de corte, seguridad y protección
- Ensayos de corte y pulido en muestras de prueba de otras especies
- Uso de diferentes herramientas de corte y de materiales de pulido
- Confección de un cubo de madera con limpieza en los cortes
- Preparación del XyloTron para adquisición de imágenes

Durante el segundo semestre del 2022, se completó la etapa de confección de cubos de madera y se continuó con la prueba de diferentes herramientas de corte disponible en la Escuela de Ingeniería Forestal para resolver dificultades con las herramientas de corte (uso de sierra cinta y las marcas a nivel macroscópico). Se realizaron también pruebas con equipos Dremmel que parece son más finos en su manejo y patrón de los cortes.

Por otra parte, producto de la ampliación de actividades del OE2, se trabajó en acondicionar el XyloTron para adquirir imágenes a partir de las piezas de madera pequeñas o sea considerando las dimensiones de los cubos de madera. En el laboratorio del TEC se prototipó una pieza que se muestra a continuación:



El logro obtenido con esta pieza desarrollada por el TEC es que la base del XyloTron donde se adquiere la imagen, se puede ahora deslizar a lo largo del canal de una pieza para adquirir imágenes, considerando dos posibilidades. 1. Que se pueda trabajar el cilindro de madera completo con un corte y pulido en una de sus caras y 2. Colocar una secuencia de cubos de madera donde se pueda llevar el control del tipo de corte en la madera.

No ha sido posible hacer una publicación con los datos del XyloTron porque la subida de datos a la plataforma WordForestID requiere la autorización directa del Dr. Jhon Hermanson y a la fecha no ha validado las imágenes, por lo que ha estado fuera de las manos de los investigadores el uso autorizado de los datos.

12.2.7.2 Principal logro de la ampliación: continuidad de las investigaciones a través de nuevos proyectos

Gracias al logro al 100% de las actividades previstas en la ampliación, se hicieron nuevas gestiones para que las actividades posteriores del uso del XyloTron se transformaran en 2 nuevos proyectos:

- Un nuevo proyecto interno con contrapartida externa, el cual fue aprobado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y que lleva como nombre *“Fortalecimiento del control gubernamental sobre el trasiego ilegal de maderas mediante el uso de tecnologías de análisis de autenticación: uso del XyloTron en Costa Rica”*. El grupo de investigadores

han iniciado una nueva fase a partir del 01 de julio del 2022 hasta el 30 de junio del 2024. Adicionalmente a la colecta de nuevas muestras de las especies iniciales, se trabajará con un nuevo grupo de especies que incluyen el género *Handroanthus* sp. y *Tabebuia* sp.

- Una propuesta de proyecto de investigación titulado “Integración de herramientas tecnológicas para apoyar el manejo, conservación y reducción de la tala ilegal de especies maderables de Costa Rica” enviado a la convocatoria de Fondos del Sistema CONARE 2024.

12.3 OE3. Generar modelos de diferenciación fisiológica para manejo y conservación a partir de las caracterizaciones hiperespectrales anatómicas y colorimétricas.

Las actividades de este objetivo específico permitieron publicar otros 3 artículos científicos y la escritura de un cuarto artículo. A continuación, se presenta los detalles más importantes de las publicaciones y que resumen los productos de este objetivo específico.

Artículos

Valverde, J. C., Arias-Aguilar, D., Rodríguez-Solís, M., & Villalobos, N. Z. (2022). Differentiation of tropical tree species with leaf measurements of hyperspectral reflectance. *Environmental Sciences Proceedings*, 22(1), 47. <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13084>

Valverde Otárola, J.C., Arias-Aguilar, D., Arias- Ceciliano, K., Castillo, M., Miller, C., Aguilar, H., & Flores, D. (2020). Identificación de patrones de reflectancia espectral y colorimétricos en madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(2), 262-281.

Valverde, J. C., Arias-Aguilar, D., Montero-Zeledón, E., & Gutiérrez-Fallas, D. (2021). Fluorescence, reflectance, and physiological response to water stress in *Gmelina arborea* Roxb seedlings. *Uniciencia*, 35(1), 320-334.

12.3.1 Resumen del artículo publicado sobre Diferenciación de especies arbóreas tropicales con mediciones foliares de reflectancia hiperespectral

El desarrollo de indicadores no destructivos de reflectancia hiperespectral a nivel de hoja es el primer paso en la cartografía de especies arbóreas amenazadas en los trópicos. Por lo tanto, se implementó el uso de una base de datos de la reflectancia hiperespectral a nivel foliar para diferenciar 15 especies de árboles de los bosques de Costa Rica. La reflectancia hiperespectral (en el rango de 310 a 1100 nm) fue evaluada en seis individuos por especie (30 hojas por individuo) en la estación lluviosa. Además, se evaluó el área foliar específica (SLA) y el espesor foliar (LT). Los datos se analizaron primero mediante ANOVA unidireccional para identificar bandas diferenciadoras entre especies. A continuación, se utilizó el análisis discriminante lineal (LDA) para clasificar las especies y definir el grado de similitud, y la contribución de cada banda estrecha a la

clasificación se estimó con el valor absoluto de los coeficientes estandarizados asociados a la función discriminante (valor kappa). Posteriormente, se determinó si el SLA o el LT se correlacionaban con la diferenciación de especies. Los resultados mostraron que las bandas de longitud de ondas al 350, 700, 750, 780, 790, 800 y 1010 nm eran clave para diferenciar las especies, con un valor kappa medio de 0,88. Además, se descartó la correlación de la reflectancia hiperespectral con el SLA y el LT. Los resultados sugieren el valor de diferenciar especies arbóreas tropicales mediante métodos no destructivos, lo que puede facilitar la cartografía de poblaciones amenazadas y el desarrollo de estrategias de conservación.

12.3.2 Principales resultados del artículo de diferenciación de especies

El siguiente cuadro resume las correlaciones obtenidas para 15 especies estudiadas

Cuadro 15. Correlaciones obtenidas para 15 especies estudiadas.

Botanical Family	Scientific Name	Diferenciative Bands (nm)	Kappa Value	p-Value	Correlation	
					SLA	LT
Bignoniaceae	<i>Handroanthus ochraceus</i>	350	0.90	0.001 **	0.22 ns	0.33 ns
Meliaceae	<i>Suietenia macrophylla</i>	700	0.88	0.001 **	0.26 ns	0.20 ns
Fabaceae	<i>Platymiscium pinnatum</i>	350, 780	0.92	0.001 **	0.33 ns	0.19 ns
Araliaceae	<i>Dendropanax arboreus</i>	780, 790	0.91	0.001 **	0.50 ns	0.10 ns
Fabaceae	<i>Inga marginata</i>	350, 800	0.89	0.002 **	0.33 ns	0.36 ns
Fabaceae	<i>Erythrina poeppigiana</i>	800	0.89	0.001 **	0.40 ns	0.41 ns
Apocynaceae	<i>Tabernaemontana litoralis</i>	800, 1010	0.92	0.001 **	0.26 ns	0.55 ns
Anacardiaceae	<i>Anacardium excelsum</i>	700, 1010	0.96	0.001 **	0.30 ns	0.56 ns
Meliaceae	<i>Trichilia havanensis</i>	800	0.95	0.003 **	0.33 ns	0.20 ns
Euphorbiaceae	<i>Croton draco</i>	350, 800, 1010	0.97	0.001 **	0.36 ns	0.14 ns
Euphorbiaceae	<i>Cronton niveus</i>	350	0.90	0.003 **	0.33 ns	0.33 ns
Solanaceae	<i>Acnistus arborescens</i>	750, 780	0.91	0.002 **	0.26 ns	0.40 ns
Verbenaceae	<i>Citharexylum donnell-smithii</i>	700, 800, 1010	0.92	0.004 **	0.21 ns	0.50 ns
Meliaceae	<i>Cedrela tonduzii</i>	1010	0.89	0.008 **	0.22 ns	0.56 ns
Rubiaceae	<i>Tocoyena pittieri</i>	750	0.88	0.005 **	0.20 ns	0.66 ns

Se encontraron diferencias significativas en las bandas de 350, 500, 780, 790, 800 y 1010 nm según la tabla anterior. Siete especies sólo mostraron una banda diferencial significativa. Por el contrario, seis especies mostraron dos bandas diferenciadoras, y sólo dos especies mostraron diferenciación en tres bandas hiperespectrales.

Para todas las especies, se obtuvo un valor kappa de análisis discriminatorio superior a 0,88, lo que de las diferencias entre las especies con respecto a los específicos de la firma espectral. Sin embargo, se observó que la diferenciación no mostraba una correlación significativa con el SLA y el LT, lo que sugiere que ninguna de las dos variables tiene una influencia a la hora de identificar las especies con este método. Los resultados obtenidos indican el uso potencial de la reflectancia hiperespectral para la discriminación de especies, un resultado similar al propuesto por Burkholder *et al.* [13], que encontraron una precisión entre el 60 y el 85% para las especies arbóreas. El uso de bandas específicas se ha utilizado tradicionalmente para el desarrollo de indicadores de estrés hídrico, producción de clorofila y producción fotosintética, entre otros. Sin embargo, su uso para diferenciar especies en los trópicos está aún en desarrollo. La identificación y diferenciación de bandas espectrales por especies a nivel foliar es el primer paso necesario para crear identificadores que permitan analizar las poblaciones a través de imágenes y vuelos por satélite.

12.3.3 Resumen del artículo publicado sobre Fluorescencia, reflectancia y respuesta fisiológica al estrés hídrico en *Gmelina arborea*

Se realizó una caracterización de la fluorescencia, reflectancia y respuesta fisiológica al estrés hídrico en plántulas de *Gmelina arborea* Roxb. Para lo cual, se desarrolló un experimento durante 31 días con dos tratamientos: plantas testigo (se aplicó un régimen hídrico normal) y plantas en condición de estrés hídrico (a las que se les limitó en su totalidad el agua por el periodo del experimento). Para ambos métodos se implementaron clones de *G. arborea* y se evaluaron cada siete días hasta el final del experimento, se analizó la fotosíntesis, conductancia estomática, turgencia foliar, contenido relativo de clorofila, fluorescencia y reflectancia. Los resultados mostraron que la biomasa en las plantas con estrés se redujo en un 26,9 % siendo la cobertura foliar la que mostró mayor afectación (disminución del 29,1 %), la reducción de la fotosíntesis fue del 60,1 % ($5,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con respecto a la planta testigo ($14,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Para las variables conductancia estomática, turgencia y contenido relativo de clorofila el comportamiento fue de disminuir sus valores de un 20 a 60 % conforme el periodo de estrés se incrementó. Con respecto a la fluorescencia se determinaron dos patrones: de los 400 a 550 nm la fluorescencia se incrementó en las plantas estresadas, mientras que a partir de los 600 a 725 nm fueron las plantas testigo las que presentaron mayor excitación, en ambos rangos se presentaron valores máximos en los puntos correspondientes a clorofila a y b. Finalmente, la reflectancia mostró diferenciación entre los 460 y 770 nm siendo las plantas en condiciones de estrés las que presentaron una reflectancia mayor. El patrón obtenido de degradación fisiológica de las plantas estresadas se debe a la pérdida de agua del organismo que incide en cierre de estomas, aumento de producción de ácido abscísico, disminución de la síntesis de pared celular y limitaciones en la síntesis de proteínas.

12.3.4 Resumen del artículo publicado sobre Identificación de patrones de reflectancia espectral y colorimétricos en madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier.

Se determinaron los patrones hiperespectrales y colorimétricos a partir de aspectos anatómicos y físicos para la caracterización de la madera seca de *Peltogyne purpurea* Pittier, procedente de árboles de bosque natural. Se tomó una muestra de 24 discos de madera de *P. purpurea* y se caracterizaron anatómicamente (densidad y diámetro de vasos, porcentaje de vasos solitarios), densidad madera, color (CIELab) y reflectancia hiperespectral en el rango de 310 a 1100 nm en la madera seca, tanto en la sección de la albura como del duramen. Se encontraron diferencias significativas a nivel anatómico entre albura y duramen; encontrando una presencia mayor de vasos solitarios en albura (34,28 %) pero con una densidad de vasos de 27,07 poros mm^{-2} y diámetro de 148,53 μm . En el análisis de la colorimetría, la luminosidad y b^* (amarillamiento) fue mayor en albura, pero con valores significativamente menores en a^* (enrojecido), generando con ello que la diferencia del color sea total (superior a 14,55). En cuanto la reflectancia se encontraron tres puntos de diferenciación significativa entre ambas secciones, que fueron a los 460, 580 y 1020 nm; al correlacionar estos tres segmentos no se encontró correlación alguna con los aspectos anatómicos,

pero sí con la densidad de la madera (superiores a 0,69), a nivel de color no se encontraron relaciones con el parámetro de color L* (luminosidad), mientras que a* solo mostró correlaciones inversas a los 580 nm y lineales con b* a 580 nm. En este estudio no se encontraron relaciones colorimétricas con aspectos anatómicos.

12.3.5 Avances en los análisis de nuevos datos para un nuevo artículo científico

Con los datos de reflectancia de hojas de 12 especies de árboles (Cuadro 16) se está generando una nueva publicación sobre la capacidad de diferenciar las especies por las características de las firmas hiperespectrales de las hojas .

Cuadro 16. Lista de especies evaluadas y localización de los árboles considerados

Code	Family	Species	Sample (trees)	Location
Ag	<i>Astronium graveolens</i>	<i>Anacardiaceae</i>	5	Santa Ana
Ca	<i>Cordia alliodora</i>	<i>Cordiaceae</i>	5	Santa Ana, Selva
Cb	<i>Calophyllum brasiliense</i>	<i>Calophyllaceae</i>	5	Inbio, Sabana
Co	<i>Cedrela odorata</i>	<i>Meliaceae</i>	5	Inbio
Ct	<i>Cedrela tonduzii</i>	<i>Meliaceae</i>	5	Zarcero
Dp	<i>Dipteryx panamensis</i>	<i>Fabaceae</i>	5	Selva
Dr	<i>Dalbergia retusa</i>	<i>Fabaceae</i>	5	Inbio, Santa Ana
La	<i>Lecythis ampla</i>	<i>Lecythidaceae</i>	5	Selva
Mb	<i>Myroxylon balsamum</i>	<i>Fabaceae</i>	5	Santa Ana
Mg	<i>Miconia guianensis</i>	<i>Olacaceae</i>	5	Selva
Pp	<i>Platymiscium pinnatum</i>	<i>Fabaceae</i>	5	Selva
Sm	<i>Swietenia macrophylla</i>	<i>Meliaceae</i>	5	Inbio
To	<i>Terminalia oblonga</i>	<i>Combretaceae</i>	5	Inbio, Sabana
Vk	<i>Virola koschnyi</i>	<i>Myristicaceae</i>	5	Selva
Vs	<i>Virola sebifera</i>	<i>Myristicaceae</i>	5	Selva

Modelo de discriminación fue de tipo red neuronal supervisada con un sistema de descarte basado en Random Forest

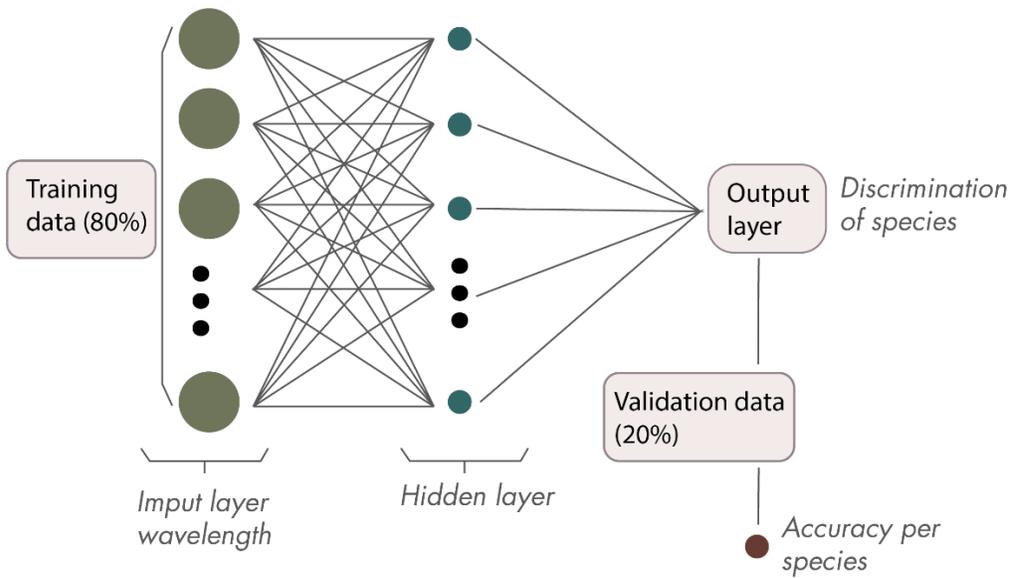


Figura 24. Arquitectura representativa de la red neuronal (ANN) utilizada para análisis de reflectancia espectral y primera derivada en hojas de 12 especies arbóreas tropicales

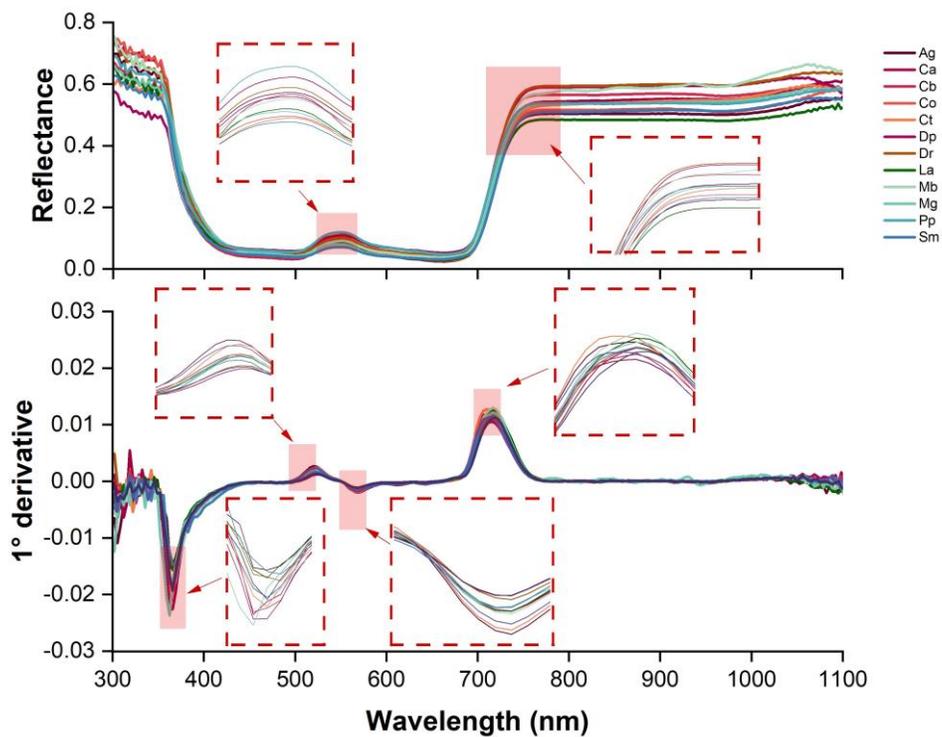


Figura 25. Reflectancia espectral promedio y primera derivada en hojas de 12 especies arbóreas tropicales. Segmento en línea intercalada corresponden a zoom de puntos de interés de las curvas.

Valores kappa son un primer layer para descartar bandas que no aporten significancia en la discriminación, esta etapa permite limpiar la información al momento identificar rasgos diferenciadores

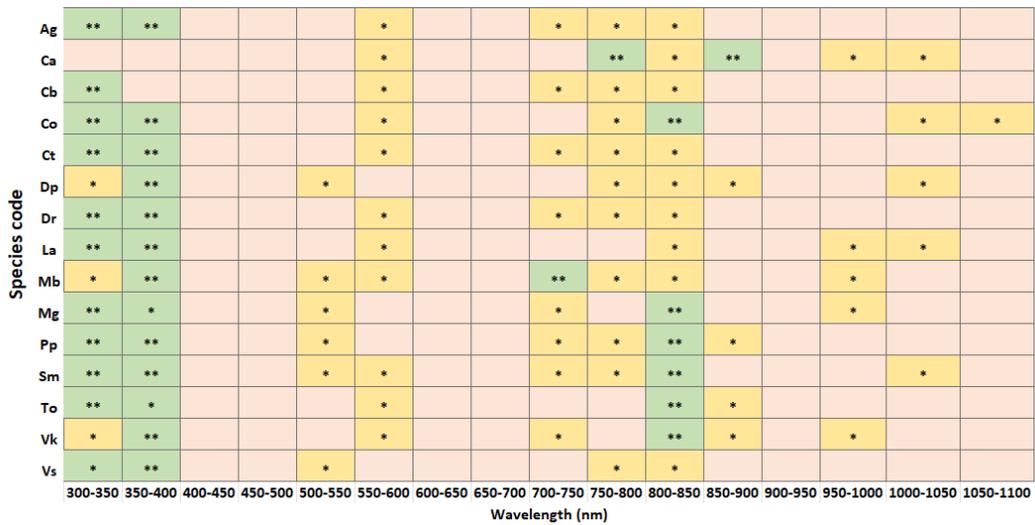


Figura 26. Distribución de similitud de factor kappa entre valores de reflectancia espectral en hojas 12 especies arbóreas tropicales. (celdas color rosa no muestran significancia, * significancia a 0.05 y ** significancia a 0.01)

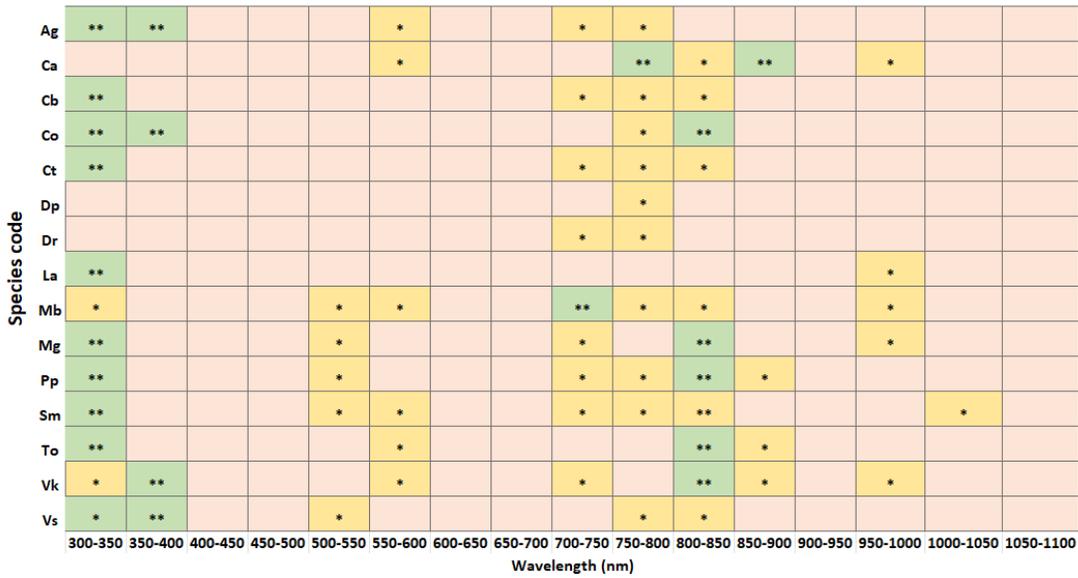


Figura 27. Distribución de similitud de factor kappa entre valores de la primera derivada de la reflectancia en hojas 12 especies arbóreas tropicales. (celdas color rosa no muestran significancia, * significancia a 0.05 y ** significancia a 0.01).

Cuadro 17. Accuracy obtenido en la identificación de las especies tanto etapa de entrenamiento como validación

Code	Reflectancia		1° derivada de la reflectancia	
	Bandas distintivas	Accuracy (%)	Bandas distintivas	Accuracy (%)
Ag	360, 370, 376	92.2	360	95.3
Ca	360, 590, 720, 740	90.6	720	96.6
Cb	790	96.6	790	97.5
Co	400, 650, 660	92.3	400	98.0
Ct	590, 600, 800	95.1	600	97.9
Dp	800	98.8	800	98.2
Dr	670, 680, 700, 800	96.6	670	95.6
La	350, 570	95.2	350	96.6
Mb	550, 590, 700	94.5	590	99.0
Mg	350, 500	96.3	350	95.8
Pp	360, 390, 730	92.5	730	96.5
Sm	530, 800	93.3	795	97.0
To	560, 810	90.1	805	98.1
Vk	360, 550, 790	92.2	790	96.6
Vs	380, 790	93.0	380	95.5

12.4 OE4. Proponer los indicadores fisiológicos a partir las variables analizadas como mecanismo de identificación botánica.

En este objetivo del proyecto se plantearon dos productos: 1. Un taller que se presente el dispositivo, aplicabilidad y análisis de datos y 2. Una propuesta metodológica de uso fisiológico como criterio para conservación. Con respecto al taller en realidad se lograron organizar dos talleres diferentes y con respecto a la propuesta metodológica se lograron formular dos nuevos proyectos (uno ya aprobado por la VIE y otro que está en análisis en CONARE). A continuación, se detalla los logros obtenidos en el cumplimiento de este objetivo.

12.4.1 Taller: Instrumentación para el entendimiento de la reflectancia en árboles del trópico mesoamericano

A continuación, se presenta la conceptualización y el resumen del primer taller organizado por el proyecto.

Taller: Instrumentación para el entendimiento de la reflectancia en árboles del trópico mesoamericano

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.

Es por esta razón que como parte del proyecto de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC: *“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”* (figura 28); el día sábado 22 de octubre de 2022, se realizó un taller para compartir experiencias y conocimientos de la adquisición y uso de instrumentos, así como del procesamiento de datos espectrales a partir de imágenes del espectro visible de las hojas y su reflectancia, con la finalidad de analizar variables fisiológicas de las especies árboles tropicales. También se recopiló información de los participantes de las nuevas líneas de investigación sobre el uso de herramientas tecnológicas para el manejo y conservación forestal.

En el taller se tuvo la participación de personal de Centro Nacional de Alta Tecnología, Universidad de Costa Rica (PRIAS), Universidad EARTH, Universidad de Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica y estudiantes de licenciatura y maestría en Ciencias Forestales y Sostenibilidad de Recursos Naturales y Tecnologías de la Producción (Anexo 1). El evento fue transmitido y grabado en el Facebook de la Unidad de Vinculación de la Escuela de Ingeniería Forestal: https://www.facebook.com/100057048115787/videos/655898072717958/?_so=_watchlist&_rv=_video_home_www_playlist_video_list

Las charas impartidas durante el taller fueron:

- **Biblioteca de Firmas Espectrales: antecedentes, investigaciones realizadas, nuevos pasos.** Ing. Heileen Aguilar Arias (PRIAS CeNAT).

- **Estudio de la productividad y biomasa mediante el uso de índices de vegetación en plantaciones de *Tectona grandis* en Guanacaste, Costa Rica** Ing. Arleth Porras Granados, estudiante de maestría (TEC).

- **Implementación de espectros de reflectancia de fibra óptica para generación de firmas espectrales y modelos predictivos en plantas de café y pastos (y su uso en el arte)** Ing. Alejandra Rojas González, investigadora y Directora de posgrado de Ingeniería en Biosistemas (UCR)

-Diseño e implementación de instrumentación forestal para la obtención y procesamiento de firmas espectrales (demostración con equipo) Ing. Arnoldo Ramirez Jiménez, investigador (TEC).

- Instrumentación para identificación automática de maderas: Xylotron. Ing. Dagoberto Arias Aguilar (TEC).

Además, se realizó una práctica de campo sobre el uso de instrumentación para toma de firmas espectrales con el instrumento desarrollado en el proyecto (spectraTEC, y los espectroradiómetros UNISPEC y Fieldspect)

En las siguientes imágenes se evidencian los logros del taller:

La Unidad de Vinculación Forestal
TEC invita al taller:

**Instrumentación para el
entendimiento de la
reflectancia en árboles
del trópico
mesoamericano**

Modalidad: Híbrida

 **Sábado 22 de octubre 2022**

 **8:15 a.m. a 11:00 a.m.**

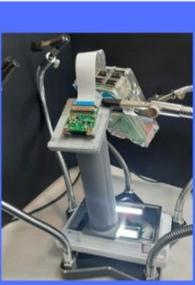
 **zoom**

Cupo limitado

Inscripciones gratuitas

 **TEC** | Tecnológico
de Costa Rica

 **ECO
PLANT**



 **Unidad de
Vinculación
Forestal**

Figura 28. Detalle de la invitación al taller de Instrumentación en modalidad híbrida

Taller de Instrumentación 22 octubre 2022

Número	Nombre Completo	Institución/Empresa	Firma
1	Carlomagno Soto	EARTH	[Firma]
2	Charlyna Masís	EARTH	[Firma]
3	Juan Pato González Ramírez	Estudiante Maestría	[Firma]
4	Miranda Cordero Aguilar	Estudiante maestría	[Firma]
5	Erica Ramírez Chavarria	Estudiante/TEC	[Firma]
6	María Rodríguez S	TEC	[Firma]
7	David Romero B	PRIAS-CENAT	[Firma]
8	Jesha Jimenez Jimenez	Paramopica Woods	[Firma]
9	MONICA AROYA S.	Estudiante Maestría	[Firma]
10	Arleth Porras G.	Estudiante Maestría	[Firma]
11	Heileen Aguilar	CENAT - PRIAS	[Firma]
12	Sebastián Sánchez	Estudiante Diseño TEC	[Firma]
13	Dagoberto Ariza A.	TEC	[Firma]
14	Arnoldo Alvarado	TEC	[Firma]
15	Alejandra Rojas	UCR Biosistemas	[Firma]
16	[Firma]	TEC	[Firma]
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			

Figura 29. Lista de participantes en el taller: Instrumentación para el entendimiento de la reflectancia en árboles del trópico mesoamericano.



Figura 30. Charla sobre el estudio de la productividad y biomasa, Ing. Arleth Porras Granados (TEC).



Figura 31. Práctica de campo sobre el uso de instrumentación para toma de firmas espectrales. Ings David Romero y Heileen Aguilar (PRIAS CeNAT), Ing. Alejandra Rojas (Biomateriales UCR), Ing. Arleth Porras (estudiante de maestría en Ciencias Forestales TEC).



Figura 32. Asistentes al taller en práctica de campo, demostración de equipo para toma de firmas espectrales.

12.4.2 Taller de Co-Ideación: “Biomimética de Árboles Tropicales”

Durante el mes de diciembre del 2022, el becario Sebastián Sanchez, con el apoyo de la investigadora Heileen Aguilar (PRIAS) y de su tutor Dagoberto Arias (ECOPLANT) organizaron y ejecutaron un evento que se llevó a cabo el 06 de diciembre del 2022 titulado “*Taller de Co-Ideación, Biomimética de Árboles Tropicales*”.

El Taller de Co-Ideación partió de la intención de diseñar un espacio para co-crear soluciones tecnológicas a partir de conocimientos generados en la investigación, es decir, aplicando el principio biomimético de abstracción “*desde la biología a la tecnología*”. Para este cometido, el becario Sebastián Sánchez diseñó infografías (figura 33) con los datos procesados en los meses anteriores en conjunto con el equipo de investigadores del proyecto, como material de insumo a los participantes para imaginar y construir sus propuestas de soluciones biomiméticas basadas en la naturaleza.

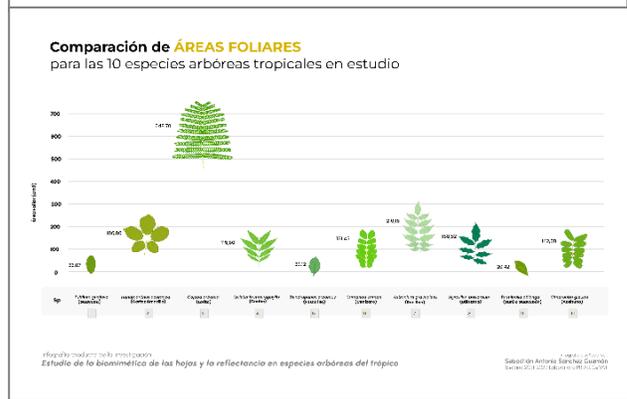
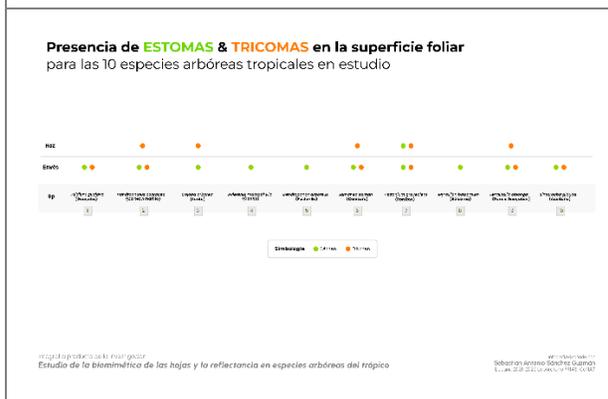
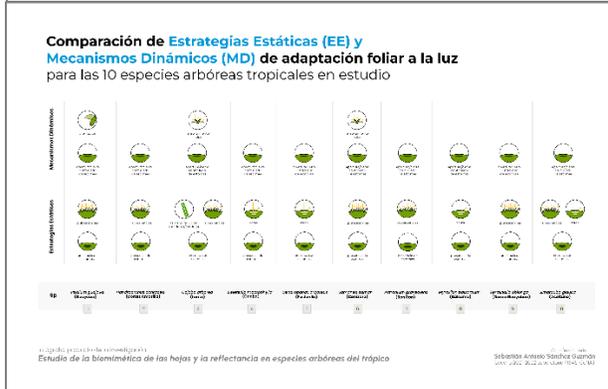
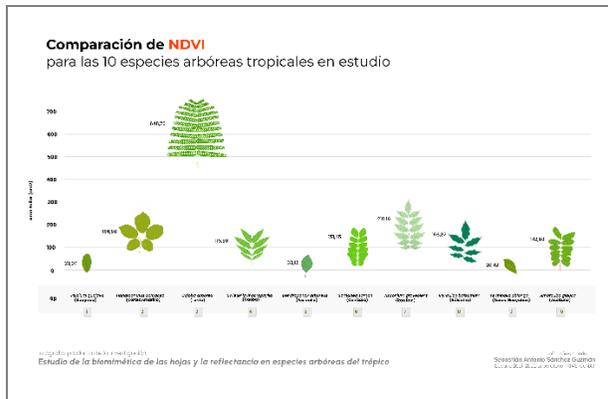


Figura 33. Infografías diseñadas por el becario Sebastián a partir de los datos procesados con su tutor Dagoberto para el Taller de Co-Ideación.



Figura 34. Invitación digital diseñada por el becario Sebastián para convocar a los participantes para el Taller de Co-Ideación.

El formato de diseño colaborativo de este evento permitió crear una experiencia en la cual los participantes, profesionales de diversas disciplinas, confluieron para que, algunos por primera vez, tuvieran un espacio para proponer soluciones basadas en la naturaleza.



Figura 35. Arriba: Señalización de evento en puerta de Auditorio Edificio CONARE. Abajo: Becario Sebastián exponiendo la investigación desarrollada.



Figura 36. Arriba: Infografías diseñadas y facilitadas por el becario Sebastián a partir de datos procesados en conjunto con su tutor Dagoberto. Abajo: Equipo 1 durante sesión de trabajo colaborativo.



Figura 37.Arriba: Lluvia de ideas de un equipo sobre el tema desarrollado de Mobiliario Urbano.
Abajo: Equipo 2 durante sesión de trabajo colaborativo.



Figura 38. Participantes del Taller de Co-Ideación

Arriba: Lluvia de ideas de un equipo sobre el tema desarrollado de Empaque y Embalaje. Abajo: Participantes del Taller de Co-Ideación; de izquierda a derecha arriba: Mariana Ávila (asistente administrativa PRIAS), Marta Sáenz (profesora e investigadora Esc. Diseño Industrial, TEC), Sebastián Muñoz (estudiante Ing. Computadores TEC y asistente Laboratorio CNCA-CeNAT), Iván Ávila (investigador PRIAS), Cornelia Miller (directora PRIAS), Yerlyn Gutiérrez (asistente administrativa PRIAS), Mónica Porras (asistente administrativa PRIAS), Nelson Zamora (asesor beca, Esc. Ing. Forestal TEC); abajo: Sebastián Sánchez (becario, estudiante Ing. Diseño Industrial TEC), Christian Vargas (investigador PRIAS encargado de programa de becas CeNAT-CONARE), y Dagoberto ARIAS (tutor de beca, Laboratorio ECOPLANT, Esc. Ing. Forestal TEC)



Figura 39. Propuesta final del Equipo 1 sobre el tema Mobiliario Urbano. Abajo: Propuesta final del Equipo 2 sobre el tema Empaque y Embalaje.

13 Propuestas de nuevos proyectos de investigación que incidan en la conservación de especies forestales en diferentes grados de amenaza para su conservación.

Como resultado de la interacción con otros investigadores y de la realización de los 2 talleres, así como de la participación en congresos y la impartición de charlas, se lograron identificar varios elementos clave para la formulación de nuevos proyectos de investigación que tuvieran como eje central el uso de la tecnología para el estudio las especies forestales con diferentes grados de amenaza para su conservación.

Del proyecto concluido se generaron dos productos que permitieron tramitar 2 nuevas propuestas de investigación que se resumen a continuación:

13.1 Nuevo proyecto: “Fortalecimiento del control gubernamental sobre el trasiego ilegal de maderas mediante el uso de tecnologías de análisis de autenticación: uso del XyloTron en Costa Rica”

Este proyecto fue tramitado a inicios del año 2022 en una ronda de proyectos de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, y fue aprobado en la Sesión Ordinaria No. 08-2022, Parte IV, “Convocatoria por fondos concursables de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión 2022”, Artículo 10.49, del 7 de abril del 2022 y para ser ejecutada a partir del 1 de julio del 2022 al 30 de junio del 2024.

13.1.1 Resumen

El aprovechamiento de la madera en los ecosistemas tropicales está asociado a factores que siguen un sentido contrario a las buenas prácticas del manejo forestal, siendo la tala ilegal y la comercialización ilícita uno de los factores que inciden en la pérdida paulatina de la cobertura de los bosques. Costa Rica a pesar de disponer de herramientas para la conservación de sus bosques mediante un marco legal que regula la corta, aprovechamiento, transporte y comercialización de la madera, la realidad es que continua la tala ilegal de maderas de especies valiosas y que son las más vulnerable de extinción. Es difícil para las autoridades que ejercen el control forestal o las personas funcionarias en las aduanas saber qué especies de árbol se encuentran en los productos madereros o de dónde provienen. Por ello es que es necesaria la evidencia científica para apoyar o refutar las afirmaciones del origen y las especies en los productos comercializados. A nivel internacional se ha desarrollado una colección georreferenciada de muestras de referencia de madera (xylarium) amparada por especímenes con comprobantes del herbario. El programa WorldForestID inició en el 2021 en colaboración con SINAC, UNA y el TEC, los primeros trabajos de recolección en el campo, de muestras de madera y botánicas según el protocolo científico desarrollado para las tecnologías de autenticación. A partir del 2022 y con la donación de la tecnología de identificación de maderas llamado XyloTron, corresponde a las universidades iniciar nuevas investigaciones para la autenticación de nuevas especies dentro de la plataforma WorldForestID y hacer el mejor uso de la plataforma internacional del XyloTron. La presente propuesta busca fortalecer los procesos de detección y prevención del trasiego ilegal de maderas mediante la generación de conocimiento e información especializada. En esta etapa se considera la validación de la toma de fotografías con el uso de XyloTron y ampliar la generación de conocimientos para nuevas especies. A sugerencia del SINAC interesan los géneros *Handroanthus* spp. y *Tabebuia* spp., que se aprobaron para Apéndice II CITES a finales del 2022.

13.2 Nueva propuesta: Integración de herramientas tecnológicas para apoyar el manejo, conservación y reducción de la tala ilegal de especies maderables de Costa Rica

En el mes de abril del 2023 se presentó una nueva propuesta de investigación a la Comisión de Vicerrectores de Investigación para la formulación de proyectos de investigación Fondo del Sistema 2024 modalidad 2-formulario b: grupos emergentes. La propuesta involucra al TEC (coordinación) a la UNA, la UTN y al CeniBiot de CONARE.

13.2.1 Resumen

Esta propuesta busca integrar las tecnologías más recientes que se están utilizando para atender la problemática de la identificación de árboles en alguna categoría de amenaza, utilizando imágenes (fotografías estandarizadas) de la morfología de planta en vivo en campo (plataforma Pl@ntNet), imágenes de cortes de maderas (plataforma XyloTron) o bien secuenciación de ADN extraído de la madera o de partes foliares (DNA Barcoding plataformas BOLD y GeneBank). Dado que estas técnicas son altamente complementarias, la presente propuesta busca entonces hacer generar y nivelar el conocimiento para una integración del uso de dichas herramientas tecnológicas, no solo para fortalecer lo alcanzado a nivel de desarrollo e implementación en el país, sino también para apoyar directamente las gestiones de gobierno sobre el control, manejo, conservación y el trasiego, principalmente ilegal, de madera a escala nacional e internacional de especies de árboles con maderas preciosas o con alto valor comercial y que Costa Rica ha ratificado recientemente en la última convención de CITES a finales del 2022.

14 Principales conclusiones

Cada publicación del proyecto conlleva conclusiones específicas, y en esta sección se presentan las conclusiones generales:

1. Dispositivo SpectraTEC es funcional y con una precisión del 95 % para la obtención de firmas hiperespectrales.
2. El estudio de la firma hiperespectral permitió demostrar la utilidad en la diferenciación de especies y correlaciones con parámetros fisiológicos.
3. El tamaño de la parcela de campo (con la mayor área posible) juega un papel muy importante cuando se trabaja simultáneamente con imágenes de satélite y las imágenes adquiridas con drones.
4. Para obtener información válida para las publicaciones científicas 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. Incluye los permisos de colecta al día y siempre garantizar el voucher botánico en el Museo Nacional de Costa Rica.
5. Es importante dominar las técnicas para el desarrollo de modelos de estimación de productividad en función de los índices de vegetación estudiados, para cada una de las herramientas utilizadas.
6. Los modelos desarrollados para estimar biomasa deben 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.

7. 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.
8. Los modelos generados en el artículo “Modelos alométricos para la estimación de volumen y biomasa en una plantación forestal de *Tectona grandis* l.f., mediante imágenes satelitales Sentinel-2” permitieron estimar de manera indirecta el volumen, la biomasa aérea y total, mediante la información espectral derivada del sensor Sentinel 2A. La edad fue una variable predictora de importancia para la biomasa aérea y total, ya que se encuentra en ambos modelos generados, y jugó un papel de variable indicadora, como era esperado.
9. Las bandas 3, 5 y 6 de imágenes satelitales Sentinel-2 fueron variables predictoras importantes en los estudios del uso de índices de vegetación, ya que estas se encuentran presentes en los tres modelos generados. Contrario a lo que la literatura indica, en este estudio los índices de vegetación no presentaron significancia dentro de los modelos generados.
10. El desarrollo de métodos no destructivos que permitan identificar y diferenciar especies arbóreas tropicales es clave para entender la dinámica poblacional en el contexto del cambio climático. Los resultados obtenidos suponen un primer paso en la utilización de un sistema escalable a nivel de dosel y conectable con sistemas de información geográfica, lo que abre la puerta al desarrollo del seguimiento espacio/temporal de especies consideradas en peligro de extinción o endémicas.

15 Recomendaciones

En términos generales según los resultados y experiencia adquirida en el proyecto, se presentan las siguientes recomendaciones:

1. Dar continuidad a la implementación del dispositivo SpectraTEC en las fases siguientes del desarrollo de los componentes externos a prueba de las condiciones ambientales de campo para su uso en Costa Rica.
2. Generar una nueva iniciativa de proyecto para crear una librería de datos espectrales y fisiológicos de las especies maderables de Costa Rica, alojada en el TEC y que permita subir información validada por expertos y que sea de acceso público con el otorgamiento de los créditos a los investigadores y a la institución.
3. Continuar con los estudios paralelos de firmas espectrales, colorimetría e imágenes de madera para fortalecer la identificación de las especies maderables.
4. Ampliar las colectas de muestras botánicas y de maderas para fortalecer la base de datos y la librería de firmas espectrales, así como continuar los estudios sobre biomimética.

5. Continuar brindando capacitación mediante talleres sobre el uso del XyloTron, así sobre el procesamiento de firmas espectrales y el uso de índices para el monitoreo de la productividad de bosques e identificación de especies de árboles.
6. Incidir mediante nuevos proyectos de investigación en el estudio y aplicabilidad del uso de drones y cámaras especializadas, así como de imágenes de satélite para la estimación de la productividad de plantaciones y bosques, la detección de deficiencias, nutricionales, enfermedades y déficit hídrico

16 Agradecimientos

El primer agradecimiento se extiende al doctorante Máster Juan Carlos Valverde Otárola quien fue la persona que conceptualizó la propuesta original. En segunda instancia al equipo de investigadores ya referidos en este informe y muy especialmente al grupo de estudiantes que participaron activamente en todas las actividades del proyecto. A la Ing. Arleth Porras por el desarrollo exitoso de su tesis de maestría y conocimientos generados sobre el uso de índices de vegetación en plantaciones de teca. A los ingenieros Ing. Kevin Arias Ceciliano, Ing. Oscar Ortega, Ing. Paulina Mendez y el estudiante Sebastián Sánchez por su participación con proyectos de graduación específicos. A los siguientes estudiantes y profesionales que participaron en las diferentes etapas del proyecto: Ing. Mónica Araya, Hansel León González, Devon Mora Gal, Sofia Acuña, Carol Rebeca Madriz Romero, Manuel Andrés Castro Delgado, Diego Armando Gómez Arias, María Elena Esquivel Murillo, David Matos Orozco, Ing. Catalina Hernández y Jimena Rivera Aguilar. A todos un profundo agradecimiento.

Al programa de Becas CeNAT-CONARE y los funcionarios Ing. Cornelia Miller, Ing. Heileen Aguilar, Ing. Iván Ávila, Ing. David Romero y al Ing. Cristian Vargas, por el apoyo y colaboración en gran parte de las actividades del proyecto.

A la empresa Panamerican Woods y su equipo de trabajo, especialmente a Jesús, por la oportunidad y confianza, para desarrollar un componente específico de este proyecto.

Al personal del SINAC en las diferentes áreas de conservación por el acompañamiento en la fase de campo.

Al Servicio Forestal de Estados Unidos por la donación de una unidad de XyloTron y por el apoyo recibido en capacitación y el otorgamiento de los fondos externos.

Al apoyo financiero brindado por la Vicerrectora de Investigación y Extensión (VIE), al Sistema de Posgrados del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el otorgamiento de una beca, a la Escuela de Física por las facilidades a través del Dr. Ernesto Montero y al personal de la Escuela de Ingeniería Forestal por todo el apoyo administrativo, en particular a los señores Carlos Hernández y Carlos Ballesterero por el apoyo en las giras de campo. Al Área Académica Agroforestal por las facilidades otorgadas al Ing. Ramírez, egresado de la Maestría En Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de la Producción.

17 Referencias

Se incluyen en este apartado la bibliografía consultada en la formulación del proyecto. No se incluye la bibliografía actualizada que está incorporada en cada artículo publicado ni en los trabajos de graduación y las tesis.

Brown, S; Heldrick, D; Maxine, C. 2012. Assessing drought-driven mortality trees with physiological process-based models. *Agricultural and Forest Meteorology*. 323: 279-290.

Guo, A; Chodak, M; Pietrzykowski, M; Sroka, K. (2018). Tree growth patterns associated with extreme longevity: implications for the ecology and conservation of primeval trees in Mediterranean mountains. *Anthropocene* 75: 156-176

Nakamura, A; Kitching, R; Cao, M; Creedy, T; Fayle, T; Freiberg, M; Hewitt, C; Itioka, T; Koh, L; Ma, K; Malhi, Y; Mitchell, A; Novotny, V; Ozanne, C; Song, L; Wang, H; Ashton, L. (2017). Forests and Their Canopies: Achievements and Horizons in Canopy Science. *Trends in Ecology & Evolution*. 32: 438-452.

Shi, Y; Skidmore, A; Wang, T; Holzwarth S; Heiden, U; Pinnel, N; Zhu, X; Heurich, M. (2018). Tree species classification using plant functional traits from LiDAR and hyperspectral data. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*.73:207-219.

Tero, K; Kimmo, K; Ville, V. (2017). *Make Sensors. Maker media*. 379 p.

Gerhards, M., Rock, G., Schlerf, M., & Udelhoven, T. (2016). Water stress detection in potato plants using leaf temperature, emissivity, and reflectance. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 53, 27e39.

Gowen, A. A., Feng, Y., Gaston, E., & Valdramidis, V. (2015). Recent applications of hyperspectral imaging in microbiology. *Talanta*, 137, 43e54.

Gowen, A., O'Donnell, C., Cullen, P., Downey, G., & Frias, J. (2007). Hyperspectral imaging an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science and Technology*, 18, 590e598.

Guinon, J. L., Ortega, E., García-Anton, J., & P_erez-Herranz, V. (2007). Moving average and savitzki-golay smoothing filters using mathcad. In *Papers ICEE*, 2007.

Hernandez-Sanchez, N., Moreda, G. P., Herre-ro Langreo, A., & Melado-Herreros, A. (2016). Assessment of internal and external quality of fruits and vegetables. In N. Sozer (Ed.), *Imaging technologies and data processing for food engineers* (pp. 269e309). Cham: Springer International Publishing.

Hughes, G. P. (1968). On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 14, 55e63.

18 Apéndice

Se incluyen las publicaciones generadas en el proyecto