

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS PARA LA
ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA DEL DOSEL EN
SISTEMAS AGROFORESTALES DE *Musa textilis* (Neé)
ASOCIADO A ESPECIES MADERABLES EN COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

CYNTHIA GIMENA MONGE GUZMÁN

CARTAGO, COSTA RICA, 2022



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**COMPARACIÓN DE TRES MÉTODOS PARA LA
ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA DEL DOSEL EN
SISTEMAS AGROFORESTALES DE *Musa textilis* (Neé)
ASOCIADO A ESPECIES MADERABLES EN COSTA RICA**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA**

CYNTHIA GIMENA MONGE GUZMÁN

CARTAGO, COSTA RICA, 2022

Comparación de tres métodos para la estimación de la cobertura del dosel en sistemas agroforestales de *Musa textilis* (Neé) asociado a especies maderables en Costa Rica

Comparison of three methods for estimating canopy coverage in agroforestry systems of *Musa textilis* (Neé) associated with timber species in Costa Rica

Cynthia Monge-Guzmán¹

Resumen

La *Musa textilis*, mejor conocida como abacá, es una especie perteneciente a la familia Musaceae, la cual es cultivada en Costa Rica con el fin de producir fibra comercial para su exportación. La presente investigación tuvo como objetivo comparar tres métodos para la estimación de cobertura del dosel en sistemas agroforestales de abacá asociado a especies maderables en la Región Huetar Norte y Atlántica de Costa Rica. Esto con la finalidad de brindarle a la persona productora la mejor opción para la estimación de cobertura del dosel en su cultivo, tomando en cuenta factores estadísticos, costos, precisión y accesibilidad para el productor. Los métodos de evaluación utilizados fueron un densiómetro esférico cóncavo, un densiómetro cúbico de fabricación casera y la aplicación móvil HabitApp. Se utilizó estadística no paramétrica para el análisis y comparación de los métodos empleados, obteniendo como resultado que hay diferencias significativas en la estimación de la cobertura del dosel según el instrumento utilizado, ya que dependen de la distribución tanto horizontal como vertical de las especies para cobertura en el sistema agroforestal.

Palabras clave: Agroforestería, *Musa textilis*, Porcentaje de cobertura del dosel, Evaluación de cobertura.

Abstract

The *Musa textilis*, better known as abaca, is a species belonging to the Musaceae family, which is cultivated in Costa Rica to produce commercial fiber for exportation. The objective of this research was to compare three methods for estimating canopy cover in abaca agroforestry systems associated with timber species in the North Huetar and Atlantic Region of Costa Rica. This in order to provide the producers with the best option for estimating canopy cover in their crop, taking into account statistical factors, costs, precision and accessibility for the producer. The evaluation methods used were a concave spherical densiometer, a homemade cubic densiometer and the HabitApp mobile application. Non-parametric statistics were used for the analysis and comparison of the methods used, obtaining as a result that there are significant differences in the estimation of the canopy cover according to the instrument used, since they depend on both the horizontal and vertical distribution of the species for cover in the agroforestry system.

Keywords: Agroforestry, *Musa textilis*, Canopy cover percentage, Coverage evaluation.



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.

¹Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; cinjmonge@hotmail.com

Acreditación

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador integrado por la Ing. Maribell Jiménez Montero, M.Sc., Ing. Mario Guevara Bonilla, M.Sc., y el Ing. Dagoberto Arias Aguilar, Ph.D., como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Ing. Maribell Jiménez Montero, M.Sc

Profesora tutora

Ing. Dagoberto Arias Aguilar, Ph.D

Profesor lector

Ing. Mario Guevara Bonilla, M.Sc

Profesor lector

Ing. Dorian Carvajal Vanegas, M.Sc

Coordinador Trabajos de Graduación

Cynthia Monge

Cynthia Gimena Monge Guzmán

Estudiante

Dedicatoria

Primeramente, a Dios y a la vida por permitirme alcanzar el sueño de ser profesional y por darle alegría y orgullo a mi familia.

A mis papás Fabio e Iveth, por todo el esfuerzo y sacrificio que hacen todos los días por la educación y formación de Fabiola y mía.

A Jimena, mi angelito que me cuida desde el cielo todos los días.

Índice General

Resumen	3
Abstract.....	4
Acreditación.....	5
Dedicatoria.....	6
Introducción.....	9
Materiales y Métodos	11
Sitios de estudio.....	11
Muestreo.....	15
Simulación en ShadeMotion 5.1.41.....	15
Análisis estadístico.....	16
Recomendación de instrumento a utilizar.	17
Resultados y Discusión	17
Conclusiones.....	24
Recomendaciones.....	25
Agradecimientos	26
Bibliografía.....	27

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Variables dasométricas utilizadas para la simulación de las especies <i>Ochroma pyramidale</i> y <i>Musa textilis</i> en el software ShadeMotion 5.1.41.	16
Cuadro 2. Valores promedio (%) por instrumento de la cobertura del dosel, según la finca en estudio.	19
Cuadro 3. Prueba Kruskal Wallis realizada en el software InfoStat.....	19
Cuadro 4. Cuadro resumen de los valores obtenidos en la simulación con ShadeMotion.	21

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de las fincas Sara-1 y Sara-4 en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 2. Ubicación de la finca Siqui-2 en San Alberto de Siquirres, Limón, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 3a. Densiómetro esférico cóncavo (izquierda). 3b. Densiómetro cúbico (derecha). Fuente: Fotografías tomadas de internet.	14
Figura 4. Aplicación móvil HabitApp. Fuente: Imagen propia.	14
Figura 5. Configuración de transectos utilizada. Fuente: Cenicafé [12].....	15
Figura 6. Número de horas sombra acumuladas con respecto a la trayectoria de luz durante la simulación.....	21
Figura 7. Comparación de los valores de sombra obtenidos con los instrumentos vs la simulación en ShadeMotion.....	22

Introducción

La agroforestería como disciplina científica es bastante reciente, con aproximadamente treinta años de antigüedad. Los primeros intentos por definirla se dieron en la década de 1970, donde se mencionaba explícitamente la participación del elemento “árbol” y a veces se exigía la presencia del componente forestal, en su mayoría con connotación maderable, el cual estaba sujeto a las técnicas de la silvicultura clásica [1]. A través del tiempo, numerosas definiciones se han propuesto por parte de investigadores en todo el mundo, diferenciadas en dos etapas: inicialmente eran muy extensas y luego se migró a conceptos más realistas y acorde a la experiencia acumulada. Así, la agroforestería se define actualmente como un sistema de uso de la tierra donde especies leñosas perennes interactúan biológica y económicamente en una misma área con cultivos y/o animales, los cuales pueden estar asociados en forma simultánea o temporal [1].

Las tecnologías agroforestales permiten la combinación de especies con requisitos ambientales distintos, mejorando así el aprovechamiento de la energía mediante una mejor utilización del espacio vertical y horizontal [2]. La conveniencia de cultivar una especie en asocio con árboles se puede considerar desde un punto de vista ecológico, donde se estudia la compatibilidad entre las especies y un punto de vista económico, por su enfoque productivo [3]. Un criterio que ha sido fundamental en los aumentos de la producción agrícola de la última mitad del siglo, es el incremento de la interceptación de la radiación solar por las plantas cultivadas, ya sea por cambios en su arquitectura o por aumentos en la densidad de población, lo cual permite que la energía lumínica interceptada se convierta en energía cosechada [4].

La *Musa textilis* también conocida como abacá, es una especie vegetal que produce una fibra natural que se extrae del pseudotallo de la planta. En Costa Rica, es un cultivo de exportación y su producción se encuentra en manos de pequeños productores [5]. Es una planta originaria de Filipinas, ampliamente distribuida en los trópicos húmedos a temperaturas de 22 a 28 °C y con un rango altitudinal que va desde los 0 hasta los 750 metros [6]. Se encuentra estrechamente relacionada con especies como el banano comestible (*Musa acuminata* y *Musa balbisiana*) [7] y su

manejo a nivel de fincas, es compatible con las políticas, estrategias de biodiversidad, descarbonización y bioeconomía impulsadas por las autoridades gubernamentales de Costa Rica [5].

La fibra obtenida del pseudotallo es utilizada para la producción de papeles finos de alta porosidad, productos no tejidos desechables, fabricación de cables y cuerdas [7]. También destaca su gran resistencia mecánica, flotabilidad, resistencia al daño por agua salada y la longitud de su material fibroso de aproximadamente 3 metros [6]. Estudios en Filipinas demuestran que el rendimiento en producción de fibra y la recuperación de esta, se aumenta cuando la irradiación de luz se redujo con cobertura artificial de malla sarán en un 50%, por lo que se comprobó que el aumento en el rendimiento total de fibra en respuesta a la cobertura, podría no sólo atribuirse al efecto positivo sobre la morfología de las plantas, sino también, en su efecto significativo en la recuperación de fibra [7].

En este contexto, la persona productora de abacá tradicionalmente ha manejado el cultivo a pleno sol y es consciente de los requerimientos de sombra del mismo, sin embargo, carece del conocimiento técnico adecuado para su estimación. Por lo que es importante conocer el porcentaje de cobertura del dosel que producen las especies arbóreas asociadas a cultivos. La presente investigación tiene como objetivo realizar una comparación de tres métodos de estimación de la cobertura del dosel, con el fin de brindarle a la persona productora opciones para su estimación en sistemas agroforestales con abacá.

Materiales y Métodos

Sitios de estudio. La investigación se realizó en tres sitios pertenecientes a productores asociados a la Asociación de Productores de Abacá y Cultivos Agroforestales (ASPA); dos fincas adyacentes (figura 1) localizadas en el caserío La Chávez en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica (10,3859 N, -83,9441 O, sistema de proyección WGS84), la primera de 1 ha (Finca Sara-1) y la segunda de 4 ha (Finca Sara-4). El sitio presenta condiciones climáticas propias de la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-T) [8], con una temperatura promedio anual de 25,9 °C y una precipitación promedio anual de 4062 mm [9]. Sus suelos se clasifican dentro del orden Ultisol [10] y presenta pendientes muy leves.

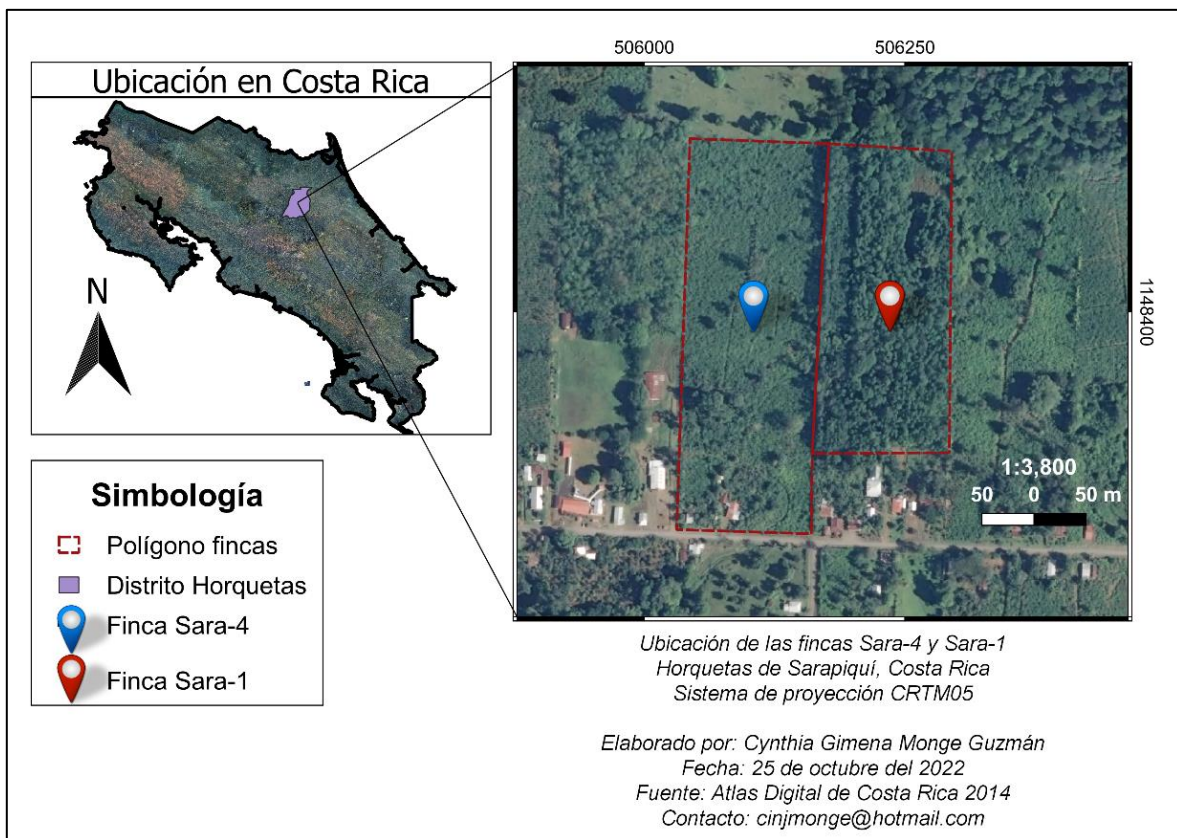


Figura 1. Ubicación de las fincas Sara-1 y Sara-4 en Horquetas de Sarapiquí, Heredia, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia.

La finca Siqui-2 de 2 ha (figura 2) se localizó en el caserío Islona en San Alberto de Siquirres, Limón, Costa Rica (10,2360 N, -83,4756 O, sistema de proyección WGS84). El sitio presenta condiciones climáticas propias de la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-P) [8], con una temperatura media anual de 26°C y una precipitación promedio anual de 3395 mm [11]. Los suelos se clasifican dentro de los órdenes Inceptisol y Ultisol [10] y su topografía presenta pendientes muy leves.

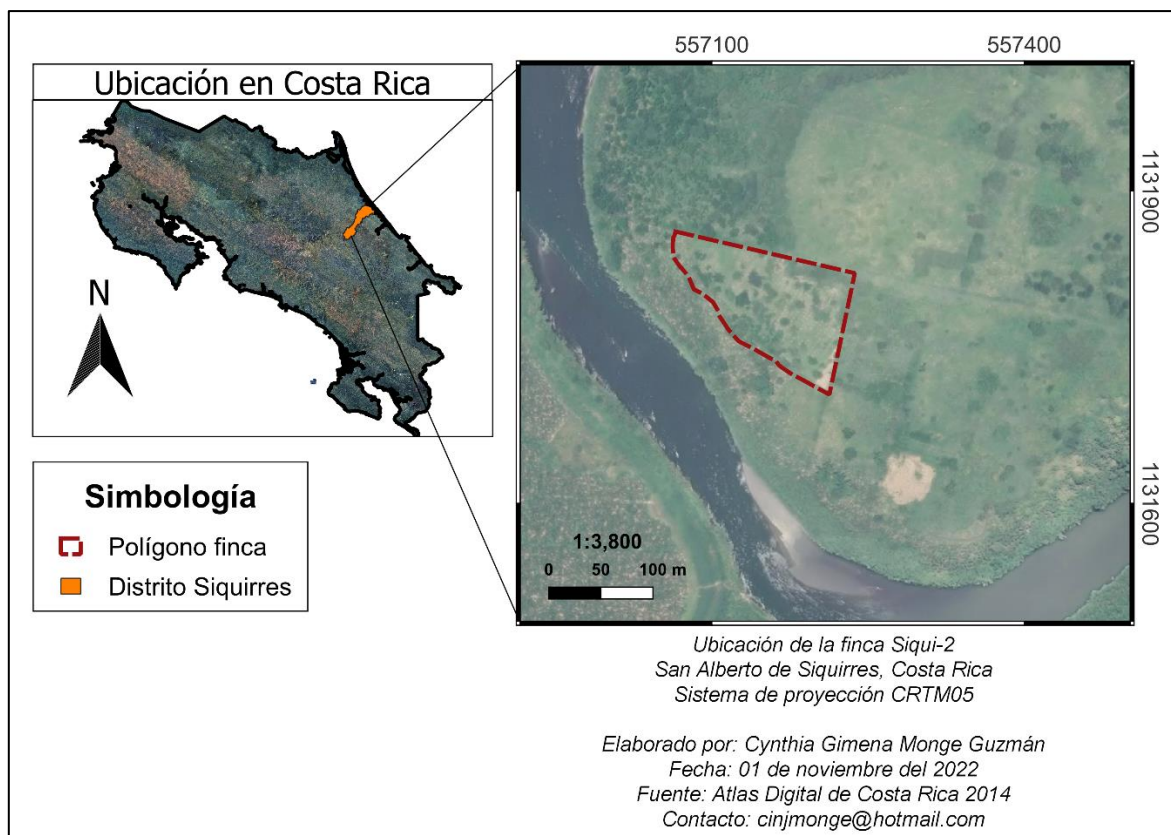


Figura 2. Ubicación de la finca Siqui-2 en San Alberto de Siquirres, Limón, Costa Rica. Fuente: Elaboración propia.

Sistemas de producción. En la región de Sarapiquí, la especie *Musa textilis* tenía 2 años de establecida con un distanciamiento inicial de siembra de 3x3 metros (1111 individuos/ha) en ambas fincas. La cobertura arbórea de la finca Sara-4 estaba compuesta por individuos de balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. Ex Lam.) Urb.) de 1,3 años de edad y presentaban un distanciamiento de siembra de 5x5 metros (400 individuos/ha). En la finca Sara-1 la cobertura arbórea estaba compuesta por un arreglo agroforestal con individuos de almendro (*Dipteryx panamensis* (Pittier) Rec.

and Mell), laurel (*Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken) y pilón (*Hieronyma alchorneoides* (Allemão) de 1,3 años, sembrados de forma intercalada a una distancia de 4x4 metros (625 individuos/ha); regeneración natural de balsa (*O. pyramidale*) de 1,5 años y, por último, rebrotes de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) de 2 años. Estas últimas dos especies, tenían la característica de ser árboles remanentes de una plantación anterior desarrollada en el sitio, por lo que su distancia de siembra es irregular en ambos casos y no fueron muestreados en esta investigación.

El abacá en la finca Siqui-2, de 7 años de establecida con una distancia de siembra de 3x3 metros (1111 individuos/ha), contaba con una cobertura arbórea compuesta principalmente por individuos de gallinazo (*Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake) de 5 años, con un espaciamiento de siembra de 5x5 metros (400 individuos/ha). En menor proporción, se encontró en asocio con especies de cedro amargo (*Cedrela odorata* L.), balsa (*O. pyramidale*) y caoba (*Swietenia macrophylla* King) también de 5 años, los cuales presentaron una distancia de siembra irregular en el sitio y no fueron muestreados en esta investigación.

Estimación del porcentaje de cobertura del dosel. Se utilizaron tres métodos de evaluación: un densiómetro esférico cóncavo modelo C (figura 3a) y un densiómetro cúbico de fabricación casera (figura 3b) con los cuales se tomaron cuatro valores distintos por instrumento, por cada punto de medición, siguiendo los puntos cardinales ubicados con una brújula Suunto KB-14. El tercer método utilizado fue la aplicación móvil HabitApp (figura 4), con la cual se procesaron las cuatro fotografías tomadas en cada punto de medición con un teléfono celular HONOR 50 lite, siguiendo la metodología anterior. Las mediciones de campo se realizaron entre las 9:00 y las 14:00 horas del día y se utilizó una base de fabricación casera, con una altura de 1,30 metros, para minimizar alteraciones en los datos provocados por errores humanos.



Figura 3a. Densiómetro esférico cóncavo (izquierda). **3b.** Densiómetro cúbico (derecha). Fuente: Fotografías tomadas de internet.



Figura 4. Aplicación móvil HabitApp. Fuente: Imagen propia.

Muestreo. Para los tres sitios en estudio, se implementó el método de transectos triangulares de 75 metros de longitud cada lado [12], medidos con una cinta métrica. Se tomaron mediciones proporcionales al área de la finca, distribuidas uniformemente cada 3,75 metros con el fin de obtener un mínimo de 20 mediciones/transecto/hectárea (figura 5), para un total de 120 puntos de medición en la finca Siqui-2, 180 en la finca Sara-4 y 60 en la finca Sara-1.



Figura 5. Configuración de transectos utilizada. Fuente: Cenicafé [12].

Simulación en ShadeMotion 5.1.41. La modelación de sistemas de producción, es una herramienta de gran utilidad para la sistematización de los conocimientos existentes y para respaldar la toma de decisiones con respecto a situaciones de incertidumbre y variabilidad espacial [13]. El software ShadeMotion 5.1.41 del CATIE, estima la posición de la sombra proyectada por la cobertura en función de la unidad de tiempo básica (horas) para la modelación [14]. Por lo que, para la presente investigación, la modelación del desplazamiento de la cobertura del dosel, cumplió la función de contrastar la información obtenida de los instrumentos en la finca Sara-4 con el dato de referencia que arroja la simulación, así como el patrón de sombreado que genera el dosel a lo largo de un día. Para la simulación se utilizaron únicamente los datos de la finca Sara-4, debido a que presentó una distribución homogénea de la cobertura arbórea, contó con una sola especie arbórea para el servicio de sombreado (balsa) y fue la finca de mayor área utilizada en la investigación.

El cuadro 1, muestra las variables dasométricas utilizadas para la especie maderable y para el cultivo, en donde se ingresó en el software una nueva especie

con los valores indicados para balsa y se utilizó el banano debido a la similitud de la especie con el abacá. Se obtuvo un registro de valores cada hora, con pasos e intervalos diarios, iniciando a las 09:00 y finalizando a las 14:00 horas, finalmente se utilizó una altura del cultivo de 3 metros para evitar la simulación de la cobertura del dosel por debajo del cultivo agrícola.

Cuadro 1. Variables dasométricas utilizadas para la simulación de las especies *Ochroma pyramidale* y *Musa textilis* en el software ShadeMotion 5.1.41.

<i>Ochroma pyramidale</i>		<i>Musa textilis</i>	
Diámetro (cm)	15	Diámetro (cm)	25
Ancho de copa (m)	5	Ancho de copa (m)	3
Alto de copa (m)	4	Alto de copa (m)	3
Alto de tronco (m)	10	Alto de tronco (m)	2
%Cobertura (%)	70	%Cobertura (%)	5
Tipo de copa	Cono invertido	Tipo de copa	Cono invertido
Densidad de copa (%)	70	Densidad de copa (%)	30

Análisis estadístico. Inicialmente se realizó una prueba de normalidad en el software Past 4.05 de la totalidad de los datos para conocer su distribución, obteniendo como resultado una distribución anormal. Se realizó un análisis de varianza inicial (ANDEVA) y se obtuvo que los residuos del modelo no eran normales y las varianzas eran heterogéneas, por lo que el tipo de prueba estadística utilizada fue Kruskal Wallis perteneciente a la estadística no paramétrica. Se planteó como hipótesis nula que los datos no presentaban diferencias significativas entre los instrumentos utilizados.

Conociendo la naturaleza de los datos, se procesaron los datos en el software InfoStat (versión estudiantil), donde se realizó un análisis para cada finca y se hizo una codificación inicial tanto de las fincas como de los instrumentos, la variable utilizada fue el porcentaje de cobertura del dosel y los criterios de evaluación fueron finca e instrumento. Los resultados de las pruebas estadísticas, permitieron hacer

la comparación entre los métodos de medición utilizados y del análisis de la información se derivó la recomendación a la persona productora del instrumento que mejor se adaptaba a las condiciones de su finca.

Recomendación de instrumento a utilizar. Para realizar la recomendación del instrumento que se adaptaba mejor a los patrones de sombreado en las fincas, se tomaron en cuenta criterios estadísticos, de costo, precisión de la medición y accesibilidad para el productor. La herramienta recomendada debía ser sencilla de utilizar, económica y de fácil adaptabilidad para los productores, por lo que se realizó una búsqueda de precios de los instrumentos en el mercado y se utilizó el contraste obtenido de la simulación en la finca Sara-4 para respaldar la recomendación.

Resultados y Discusión

El densiómetro esférico cóncavo es un instrumento ampliamente utilizado para mediciones de cobertura del dosel en especies forestales y está especialmente diseñado para trabajar directamente en el campo. Debido a sus características, uso comercial y materiales de fabricación, es un instrumento que requiere un costo elevado de adquisición [15] el cual ronda los 73,000 colones en el mercado. (120 dólares) [16]. Es un instrumento ampliamente utilizado en manuales de campo para el desarrollo de inventarios forestales [17], así como estimación y evaluación de porcentaje de sombra en cafetales [12] [18] y cacaotales.

El densiómetro cúbico es un instrumento sencillo de construcción artesanal, con un costo aproximado entre los ocho y diez mil colones (13-16 dólares), el cual permite realizar una estimación aproximada del porcentaje de cobertura que proyectan los árboles a los cultivos como café y cacao [12]. Por otra parte, HabitApp es una aplicación móvil gratuita, que no requiere configuración inicial ni conexión a internet para su funcionamiento, motivos por los cuales fue utilizada para la presente investigación. Está diseñada para realizar de forma sencilla la evaluación de

cobertura del follaje [15], sin embargo tiene las limitantes de que no existe posibilidad de excluir de la medición, el porcentaje de ramas gruesas y fustes de los árboles, por lo que en todos los casos sobreestima el porcentaje de cobertura en un sitio con respecto a los otros dos instrumentos evaluados. Existen otras herramientas como la plantilla visual de sombrío (PVS) y el densiómetro de punto (DP) [12].

Es importante mencionar, que los patrones de sombra fueron distintos en todos los sitios, la finca Sara-1 contó con tres especies de la misma edad, con arquitectura de copas distintas entre sí, sembrados de forma intercalada y con un distanciamiento conocido. Los individuos no tenían ningún tipo de raleo ni cosecha al momento de realizar la investigación. La finca Sara-4 contaba únicamente con individuos de una sola especie sembrados de forma sistemática en todo el terreno, mientras que la finca Siqui-2 presentó el caso contrario, la cobertura del follaje fue heterogénea y bastante tenue debido a que la especie maderable dominante fue gallinazo y sus hojas compuestas y arquitectura de copa permiten la entrada de luz, por lo que los datos permitieron visualizar una clara diferencia inicial entre los promedios de sombra obtenidos entre instrumentos dentro de la misma finca, razón por la cual los promedios en las fincas de Sarapiquí no variaron de forma tan marcada.

Al realizar el análisis de varianza por finca (cuadro 2), la variación de cobertura en la finca Siqui-2 y Sara-4, presentaron un $p\text{-value} < 0,05$ (0,0001 y 0,0171 respectivamente) por lo que se rechazó la hipótesis nula y se obtuvo como resultado que sí existían diferencias significativas entre los instrumentos, mientras que la finca Sara-1, presentó un $p\text{-value}$ ligeramente mayor a 0,05 (0,0544) donde estadísticamente, no hay significancia entre los valores de los instrumentos.

Cuadro 2. Valores promedio (%) por instrumento de la cobertura del dosel, según la finca en estudio.

Variable	Finca	Instrumento	N	Medias	Medianas	CV (%)	H
P_cobertura	1	1	40	94,48 ^c ± 5,44	95,16	6	63,13
P_cobertura	1	2	40	86,31 ^b ± 14,83	90,75	17	
P_cobertura	1	3	40	68,53 ^a ± 13,19	70,13	19	
P_cobertura	2	1	20	74,22 ± 19,75	82,81	27	5,82
P_cobertura	2	2	20	70,48 ± 22,69	78,13	32	
P_cobertura	2	3	20	64,63 ± 16,27	65,25	25	
P_cobertura	3	1	60	77,52 ^b ± 21,05	87,19	27	8,14
P_cobertura	3	2	60	72,63 ^{ab} ± 23,44	80,63	32	
P_cobertura	3	3	60	71,43 ^a ± 19,98	79,63	28	

*Letras iguales leídas verticalmente indican promedios iguales según la prueba Kruskal Wallis (p -value<0,05), valores sin letras indican similitud estadística entre promedios.

De forma más clara se logró visualizar en el cuadro 3, la finca Siqui-2 presentó variaciones significativas entre los instrumentos, donde la aplicación móvil reflejó la menor cobertura (68,53%), seguido del densiómetro cúbico (86,31%) y por último el densiómetro cóncavo (94,48%), lo cual indica que, ante la presencia de patrones de cobertura diversos, sí es influyente el tipo de instrumento utilizado. La finca Sara-4 también presentó significancia entre los promedios de los instrumentos, donde se logra observar diferencias entre el densiómetro cóncavo y la aplicación móvil. Sin embargo, el densiómetro cúbico presentó mayor versatilidad ya que no hubo variaciones significativas con respecto a los otros dos instrumentos.

Cuadro 3. Prueba Kruskal Wallis realizada en el software InfoStat.

Tratamiento (Finca-Instrumento)	Clasificación	
1:3	26,83	A
1:2	67,13	B
1:1	87,55	C
3:3	77,73	A

3:2	89,02	A B
3:1	104,75	B

*Codificación de fincas: Finca Siqui-2 (1), Finca Sara-1 (2), Finca Sara-4 (3). Codificación de instrumentos: D. Cóncavo (1), D. Cúbico (2), HabitApp (3).

La finca Sara-1 resulta un caso interesante, ya que no debe obviarse que el tamaño de muestra de la finca (60 puntos de muestreo) no permite tener certeza absoluta, con respecto a los otros sitios, de que los promedios de cobertura del dosel son estadísticamente similares. Por lo que a pesar de que el análisis estadístico arroja un valor de p-value ligeramente mayor al nivel de significancia fijado (0,0544), surge la interrogante de conocer si el tamaño de muestra posiblemente dependerá no solo del área del sitio, sino que también del tipo y distribución de la cobertura arborea, y de esta manera ser capaces de verificar, si al aumentar el tamaño de muestra, los valores entre instrumentos seguirán siendo estadísticamente similares.

Al realizar la simulación de la finca Sara-4, se obtuvo como resultado que el total de cobertura proyectada fue de 78,54% con un coeficiente de variación del 2%; donde la balsa aportó un 54,98% y el abacá un 23,56%. En la figura 6, se refleja la realidad de los sistemas agroforestales, donde debe tomarse en consideración que el diseño de estos contempla un conjunto especie maderable-cultivo, ya que, al evaluar los requerimientos de sombra de la especie con fines agrícolas, es importante visualizar a la especie maderable como un complemento a la sombra que el mismo cultivo podría autogenerar.

Es fundamental tener en cuenta que los instrumentos realizan una medición indirecta de la cobertura del dosel en un sitio, en el momento en que los rayos del sol se encuentran completamente perpendiculares, situación que ocurre únicamente dos veces al año en horas cercanas al medio día [19], por lo que el resto del año, la cobertura del dosel es proyectada y esto explica la variación de los espacios sombreados en un mismo sitio, tal como logra visualizarse en la figura 6. Los valores de sombra acumulados hacen referencia a la cantidad de horas con sombra presentes en el rango horario establecido en la simulación, por lo que

claramente se puede observar que cuando se acerca el mediodía, el comportamiento de la cobertura del dosel es creciente en el sitio debido a la posición y trayectoria del sol con respecto al cultivo.

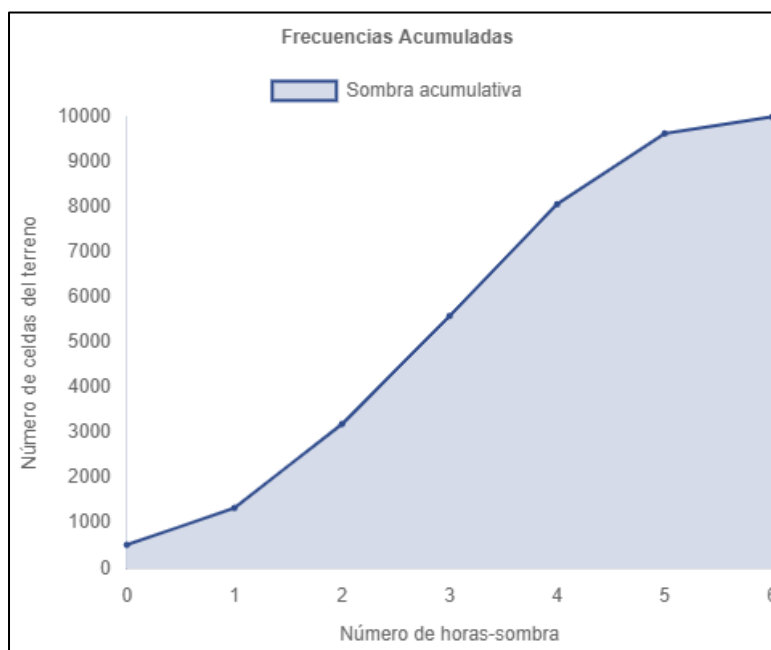


Figura 6. Número de horas sombra acumuladas con respecto a la trayectoria de luz durante la simulación.

A su vez, el resumen de los datos obtenidos en la simulación (cuadro 4) refleja que no existe un traslape en la proyección de cobertura del dosel de la especie maderable, ya que el valor de cobertura de copas no sobrepasó el 100%. Finalmente, al contrastar el valor promedio de cobertura del dosel que se obtuvo en la simulación con los valores de los instrumentos, resultó que la mayor cercanía se dio con las mediciones realizadas con el densiómetro cóncavo (figura 7).

Cuadro 4. Cuadro resumen de los valores obtenidos en la simulación con ShadeMotion.

Variable	Valor
Cantidad de árboles	400
Área total	1 ha
Densidad	400 árboles/ha

Cobertura de copa 78,5%
Área basal 7,07 m²/ha

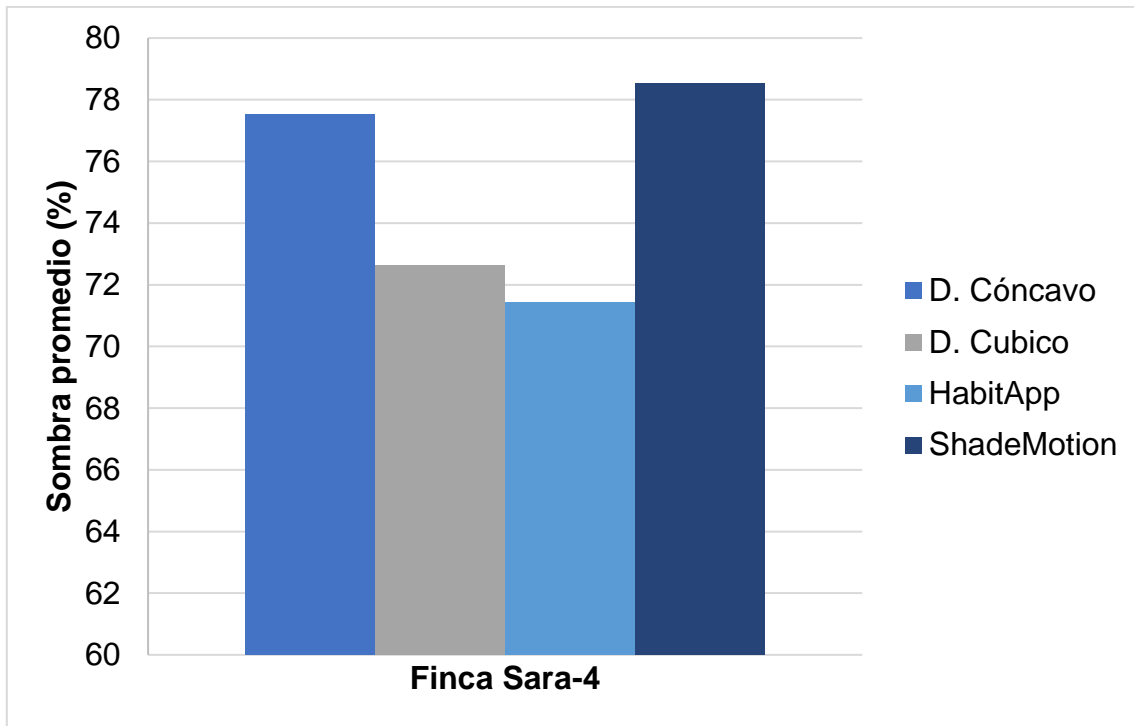


Figura 7. Comparación de los valores de sombra obtenidos con los instrumentos vs la simulación en ShadeMotion.

El método de transectos es solo una de las diversas metodologías existentes para la estimación de cobertura del dosel en sistemas agroforestales, por ejemplo en sistemas en asocio con café, se utilizan métodos de estimación directa donde se evalúa la interceptación de radiación solar por parte de los árboles que brindan el servicio, sin embargo, la instrumentación utilizada suele ser costosa y compleja; así como también se implementa la medición indirecta donde se estima la oclusión o apertura del dosel de sombra [12]. Para ambos casos, las personas productoras cafetaleras y de abacá, se ven envueltas en la problemática de no contar con metodologías rápidas, precisas y económicas para cuantificar el grado de sombrío que sus cultivos requieren, situación que repercute en la falta de conocimiento en cuanto a los momentos oportunos de intervención de los árboles [12].

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, la finca Sara-4 presentó la mayor cercanía entre los valores de cobertura arbórea, siendo el densiómetro cúbico el instrumento más versátil, sin embargo, tomando como referencia el valor promedio obtenido de la simulación, el densiómetro cóncavo fue el que tuvo mayor cercanía, por lo que cualquiera de los dos instrumentos mencionados se adaptó de manera correcta al tipo y distribución de la cobertura en la finca. A pesar de que el densiómetro cóncavo requiere de una mayor inversión inicial con respecto al cúbico, ambos requieren de condiciones climáticas óptimas para garantizar una estimación de cobertura acertada, además de ser instrumentos fabricados con materiales de calidad, alta resistencia para su uso prolongado en el campo y fácil ensamblaje, por lo que los productores podrán ser capaces de evaluar el porcentaje de cobertura en un momento específico, tomar decisiones oportunas sobre el manejo de la especie maderable y monitorear el sombreado que el mismo cultivo podría autogenerar en determinado momento. Para la finca Sara-1, se recomienda el uso de cualquiera de los dos densiómetros, teniendo en consideración que fue el único sitio que no presentó variaciones significativas entre los instrumentos, fue la finca con menor área y la que contó con mayor diversidad de cobertura arbórea. Sin embargo, se requiere investigar si al aumentar el tamaño de la muestra se obtiene o no significancia entre los instrumentos.

Finalmente, para el caso de la finca Siqui-2, queda la interrogante de conocer cuál fue el instrumento que se acercó más a las condiciones reales del sitio, debido a que existieron diferencias marcadas entre los instrumentos, la distribución de la cobertura era heterogénea y la especie arbórea brinda una sombra muy tenue al cultivo. A pesar de esto, se recomienda utilizar el densiómetro cóncavo o el densiómetro cúbico, donde es posible excluir de la medición el porcentaje de cobertura proyectada por ramas gruesas y fustes, garantizando una mejor precisión en la toma de datos en campo.

Conclusiones

El densiómetro cóncavo fue el instrumento que presentó las mediciones más consistentes y cercanas a las condiciones de sombreado presentes en las fincas Sara-1 y Sara-4.

La distribución y el tipo de cobertura resultaron ser factores determinantes para la estimación de porcentaje de cobertura, ya que cuando un sitio presentó patrones de sombreado heterogéneos como la finca Siqui-2, la estimación de cobertura del dosel fue sensible al tipo de instrumentación utilizada.

ShadeMotion fue una herramienta importante para el contraste de los datos tomados con los instrumentos, ya que permitió conocer el comportamiento exacto de la cobertura en el sitio y posteriormente, compararla con los valores obtenidos con los instrumentos.

Ante la presencia de patrones de sombreado homogéneos, es indiferente el tipo de instrumento que se utilice para estimar la cobertura en una parcela o finca, mientras que, si ocurre el caso contrario y se tienen patrones de sombra heterogéneos, es importante conocer la posición exacta de la especie que brinda sombra mediante un inventario. Además, se requiere el uso de un instrumento de alta precisión para minimizar errores, por lo que si una posible opción para los productores sería la división en parcelas de la finca, donde se logren evaluar los distintos porcentajes de cobertura.

Recomendaciones

Para futuras investigaciones, queda la interrogante de conocer con certeza cuál es el instrumento más preciso cuando se tiene un patrón de sombra diverso tanto a nivel horizontal como vertical. Además, de conocer la proyección de sombra exacta que se tendría en el caso de la finca en Siquirres, donde se recomienda realizar un inventario previo para conocer la posición de los árboles en el terreno, así como sus parámetros de copa, diámetro y altura.

Realizar el cálculo del error de muestreo para cada una de las fincas, donde se conozca el área abarcada por cada instrumento en función del área de las fincas. Esto fortalecería el uso de la metodología ya que se tendría una intensidad de muestreo inicial para su implementación.

En sistemas de área muy pequeña donde se tiene una cobertura compuesta por varias especies como la finca Sara-1, surge la interrogante de conocer si el tamaño de muestra depende también del tipo y distribución de la cobertura y no solo del área. Por lo que sería interesante investigar si al aumentar el número de puntos de muestreo en el sitio, genera o no diferencias significativas entre los instrumentos. Otra posible manera de realizar una verificación estadística sería definir diferentes porcentajes de cobertura homogénea, para realizar la comparación de los promedios obtenidos con los instrumentos.

Finalmente, se recomienda brindar capacitación a los productores en el uso de instrumentos sencillos y prácticos para la estimación de cobertura del dosel, así como en las decisiones de manejo del componente arbóreo.

Agradecimientos

A mi familia por ser el motor de mi vida y apoyarme incondicionalmente durante toda esta etapa. A los profesores y profesoras de la escuela, por ser pieza fundamental en mi formación profesional, les estaré eternamente agradecida por todas sus enseñanzas.

A la profesora Maribell Jiménez Montero, por ser una excelente guía de tesis y darme un acompañamiento tan integral durante todo el proceso de esta investigación. Los propietarios de las fincas en estudio y al profesor Dagoberto Arias Aguilar, gracias por ayudarme tantísimo durante las giras de campo y durante la elaboración de este proyecto.

Gracias al Instituto Tecnológico de Costa Rica, por darme los mejores años de mi vida, una formación de excelencia, amistades, experiencias y recuerdos que llevaré conmigo siempre. A mis amigos de siempre Adriana, Nicole, Cristina, Orlando, Steven y Gaby por su apoyo constante y amistad durante todos estos años.

Bibliografía

- [1] T. Ammour, Producción De Madera En Sistemas Agroforestales De Centroamérica. (Guillermo Detlefsen, Eduardo Somarriba ed.) Turrialba, Costa Rica: 2012.
- [2] L. Fournier, "Importancia de los sistemas agroforestales en Costa Rica", *Agronomía Costarricense*, vol. 5, no. 1/2, pp. 141-147, 1981.
- [3] B. Rapidel et al, "Efectos ecológicos y productivos del asocio de árboles de sombra con café en sistemas agroforestales," en *Sistemas Agroforestales: Funciones Productivas, Socioeconómicas Y Ambientales*, F. Montagnini et al. Colombia / Costa Rica. 2015, pp. 5-20.
- [4] F. Farfan, J. Arias and N. Riaño, "Desarrollo de una metodología para medir sombrío en sistemas agroforestales con café," *Cenicafé*, vol. 54, no. 1, pp. 24-34, 2003.
- [5] M. Araya et al, "Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales," *Tecnología En Marcha*, vol. 35, no. 6, pp. 50-59, 2022.
- [6] E. Mora et al, "Evaluación de las propiedades físicas de la fibra de Abacá (*Musa textilis*)," *Revista Biorrefinería*, vol. 4, no. 4, 2021.
- [7] M. Bande et al, "Fiber yield and quality of abaca (*Musa textilis* var. Laylay) grown under different shade conditions, water and nutrient management," *Industrial Crops and Products*, vol. 42, pp. 70-77, 2013.
- [8] L. Holdridge, *Life Zone Ecology*. San José, Costa Rica: Tropical Science Center, 1967.

- [9] M. Araya et al, "Crecimiento y desarrollo inicial de *Musa textilis* Née y su interacción con las especies maderables *Cordia alliodora*, *Hieronyma alchorneoides* y *Dipterix panamensis* en Costa Rica," *Tecnología En Marcha*, vol. 35, no. 6, pp. 43, 2022.
- [10] E. Ortiz and C. Soto, *Atlas Digital De Costa Rica 2014*. Cartago, Costa Rica: 2014.
- [11] Climate-data, "Clima ganga de Siquirres (Costa Rica)," Costa Rica, 2022.
- [12] F. Farfan, "Instrumentos Para Estimar El Porcentaje De Sombra En El Cafetal", *Cenicafe*, 2015.
- [13] M. Jiménez, J. Vera and J. Mora, "Comparación de resultados de modelación de sombras empleando Qgis y ShadeMotion en un potrero arbolado," *Revista Agroforestería Neotropical*, vol. 1, no. 6, pp. 8, 2016.
- [14] E. Somarriba et al, *ShadeMotion: El Análisis De Patrones De Sombra De Árboles*. CATIE, 2020.
- [15] F. Farfan, L. Bermúdez and N. González, *Evaluación De Herramientas Para Valorar El Porcentaje De Sombra En Sistemas Agroforestales Con Café*. S, Marín. Colombia, Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé, 2016.
- [16] Forestry Suppliers. (2021, Dic 8). Forestry Suppliers Spherical Crown Densiometers. [Online]. Available: <https://www.forestry-suppliers.com/p/43888/Forestry%20Suppliers%20Spherical%20Crown%20Densio%20meter,%20Concave%20Model%20C>.
- [17] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, *Manual De Campo. Procedimientos Para La Planificación, Medición Y Registro De Información Del Inventario Forestal Nacional Del Paraguay*. Paraguay, 2014.

[18] J. Pico Mendoza, "Evaluación De Servicios Ambientales En Sistemas Agroforestales Con Café En Fincas Bajo Diferentes Tipos De Certificaciones En Turrialba, Costa Rica", Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2011.

[19] J. Fallas Sojo, "Sol cenital en costa rica," CIENTEC, Mar 8. 2022.