Medición del dosel arbóreo en un sistema silvopastoril: un análisis de caso en la granja universitaria “La Reforma”, Universidad del Tolima

Tree canopy measurement in a silvopastoral system: a case analysis in the university farm “La Reforma”, Universidad del Tolima

Karol D. Mosquera[1], Jairo Mora Delgado[2] y Jorge Rodrigo Serrano[3]

[1]Estudiante Programa de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad del Tolima. [2] Profesor Titular, Departamento de Producción Pecuaria, Universidad del Tolima Ibagué, Colombia, [3]Profesor asistente, Departamento de Producción Pecuaria, Universidad del Tolima Ibagué, Colombia.

jrmora@ut.edu.co

Resumen

Los sistemas silvopastoriles integran árboles, pasturas y animales, por lo que la arquitectura del dosel constituye un atributo relevante para equilibrar el confort térmico del ganado y la disponibilidad de radiación para el estrato herbáceo. Este estudio evaluó el componente arbóreo de un potrero de la Granja Universitaria La Reforma, en Armero Guayabal, Tolima, mediante 130 individuos pertenecientes a nueve especies. Se realizaron mediciones de diámetro a la altura del pecho y altura total; el diámetro de copa se estimó mediante una ecuación alométrica y la oclusión del dosel se calculó a partir de fotografías procesadas con Gap Light Analyzer. Se aplicaron estadística descriptiva, análisis de componentes principales y agrupamiento mediante el método de Ward. Payandé, guácimo y dinde concentraron aproximadamente el 76% de los individuos. La población presentó elevada heterogeneidad estructural, especialmente en el diámetro de copa, cuyo coeficiente de variación alcanzó 135,9%. La oclusión promedio por especie osciló entre 75,6% en guacharaco y 91,7% en Bilibil. Los dos primeros componentes principales explicaron cerca del 66% de la variabilidad y mostraron que el diámetro de copa y la oclusión representan dimensiones parcialmente diferenciadas. El análisis de conglomerados identificó tres grupos con diferencias significativas en las variables evaluadas. Los resultados sugieren que el manejo silvopastoril debe considerar conjuntamente extensión y permeabilidad de las copas, favoreciendo configuraciones que proporcionen sombra al ganado sin restringir excesivamente la radiación disponible para las pasturas. Estas relaciones deben validarse mediante mediciones directas de microclima, radiación, forraje y respuesta animal en condiciones tropicales de bosque seco.

Palabras clave: sombra; sistemas silvopastoriles; arquitectura de copa; oclusión del dosel; Gap Light Analyzer; bienestar animal.

Abstract

Silvopastoral systems integrate trees, pastures, and animals; therefore, canopy architecture is a relevant attribute for balancing livestock thermal comfort with radiation availability for the herbaceous layer. This study evaluated the tree component of a pasture at La Reforma University Farm, located in Armero Guayabal, Tolima, Colombia, using 130 trees belonging to nine species. Diameter at breast height and total height were measured; crown diameter was estimated using an allometric equation, while canopy occlusion was calculated from photographs processed with Gap Light Analyzer. Descriptive statistics, principal component analysis, and Ward's clustering method were applied. Payandé, guácimo, and dinde accounted for approximately 76% of all individuals. The tree population showed high structural heterogeneity, particularly in crown diameter, which reached a coefficient of variation of 135.9%. Mean canopy occlusion among species ranged from 75.6% in guacharaco to 91.7% in Bilibil. The first two principal components explained about 66% of total variability and indicated that crown diameter and canopy occlusion represent partially differentiated structural dimensions. Cluster analysis identified three groups with significant differences in the evaluated variables. The findings suggest that silvopastoral management should jointly consider crown extension and permeability rather than maximizing either attribute independently. Tree configurations combining broad crowns with moderate occlusion may provide extensive shade for cattle while maintaining sufficient radiation for pasture growth. However, these functional relationships require experimental validation through direct measurements of microclimate, photosynthetically active radiation, forage production, and animal physiological and behavioral responses under representative trees from the identified structural groups under tropical dry forest environmental conditions.

Keywords: shade; silvopastoral systems; crown architecture; canopy occlusion; Gap Light Analyzer; animal welfare.

Recibido: enero de 2026
Aceptado: septiembre de 2026

Introducción

La estructura del dosel de los árboles hace referencia directa a la totalidad de las partes que componen una planta sobre el suelo; En esta se incluyen hojas, tallos o troncos y estructuras de reproducción que, en conjunto. proyectan sobre el suelo una distribución de sombra que influye directamente sobre los estratos bajos. Lo anterior debido a que la germinación, el crecimiento, la maduración y la productividad de las plantas están fuertemente influenciados por la calidad y cantidad de la luz en su entorno (Subvención, 1997) , siendo esta la principal razón que da importancia al monitoreo periódico de sombra en sistemas silvopastoriles (SSP).

La reflexión de ases lumínicos en el dosel arbóreo se encuentra estrechamente relacionado con la hora del día, latitud y altitud geográfica en el que este se encuentra (Kimmins, 1987); al ser esta una estructura de tipo tridimensional cambiante en el tiempo posee la característica de generar cambios en la absorción de la radiación solar y reflexión de la misma generando así que solo una parte de la radiación solar proyectada sobre el dosel tenga la capacidad de alcanzar el interior del sistema.

Los doseles arbóreos pueden afectar los pastos al ser afectados por el microclima en

los sistemas arborizados durante todo el año. Se ha reportado que la arquitectura del componente arbóreo puede incidir en el microclima bajo copa d ellos árboles, al modificar la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la humedad relativa (Poveda Santos et al., 2021). Esto a su vez puede afectar las características de las plantas forrajeras, en cantidad y calidad (Gómez et al., 2020).

Actualmente, la medición del dosel arbóreo y el sombrío en SSP es realizada directamente o mediante el uso de software especializados que, bien ejecutados, permiten al usuario obtener resultados confiables y aplicables a la toma de decisiones sobre el sistema.

Softwares entre los que podemos encontrar Shade Motion (Somarriba et al., 2020), Gap Ligth Analyzer (GLA) (Frazer et al., 1999), SunScan Canopy Analisys Sistem (SCAS) (Potter et al, 1996), y otros que le han apostado a permitirle al usuario una manipulación más sencilla y tecnológica entre los que encontramos HabitApp y Gap Ligth Analyzer mobile App (GLAMA) de los cuales se profundizará más adelante.

Los SSP son considerados sistemas de producción pecuaria en donde es observable una marcada interacción entre sus componentes, es decir, entre leñosas perennes tales, como los árboles y arbustos, y los componentes tradicionales: forrajes herbáceos y animales (Pezo et al, 1998). Estos sistemas pueden tener un establecimiento natural o un manejo realizada metódicamente y con fines maderables para uso industrial o de consumo, en el caso de frutales o multipropósito con el fin de generar un apoyo a la producción animal (Maecha, 2003). Los marcados beneficios de dicho sistema y de sus componentes son observables en la influencia de los arboles sobre el forraje que se encuentra bajo los mismos, y de estos como modificadores y aportantes significativos al ambiente y la producción animal (Maecha, 2003).

Teniendo en cuenta que el sector ganadero en Colombia se encuentra en su mayor porcentaje constituido por pequeños y medianos productores y las condiciones económicas que ello implica, se hace necesaria la aplicación y uso de un método practico y de bajo valor económico que permita al productor realizar una toma de decisiones sobre el sombrío; para ello, los resultados de las mediciones establecidos por un software, especializado y de fácil uso y de bajo valor económico permite la gestión adecuada de la sombra en los sistemas silvopastoriles. El objetivo de este estudio fue caracterizar el dosel arbóreo de la cerca viva y arboles dispersos presentes en de una silvopastura en una finca ganadera al alto magdalena.

Materiales y Métodos

Las mediciones de campo de este estudio fueron realizadas en el predio Granja la Reforma ubicada en el Municipio de Armero (Guayabal) al norte del Departamento del Tolima con una superficie de 451 Km2 y 285 m.s.n.m Coordenadas geográficas: Latitud: 5.03046, Longitud: -74.8865, Latitud: 5° 1' 50'' Norte, Longitud: 74° 53' 11'' Oeste. Sus condiciones ambientales se caracterizan por ser propias de un bosque seco tropical con una temperatura promedio de 27°C.

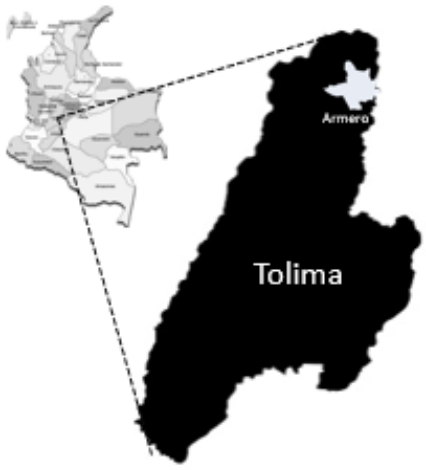


Figura 1. Localización del área de estudio Granja La Reforma, Armero Guayabal, Tolima, Colombia, 2022. Elaboración propia



Figura 2. Distribución del componente arbóreo analizado en los linderos y como parche en el SSP de La Reforma.

Para este artículo, se usó una base de datos de imágenes de los doseles de 130 árboles del proyecto "Hábitos y distribución de pastoreo de rumiantes en sistemas ganaderos extensivos"

Mediciones dasometricas y arquitectura de dosel

Se hicieron mediciones dasométricas a los 130 individuos. La altura se midió usando un clinómetro y el DAP con cinta diamétrica.

El diámetro del dosel se estimó mediante una ecuación alometrica de Almazan (2013) con base en el DAP:

D =3,45+0,1314*DAP+0,001169*DAP^2

Donde D es el diámetro de dosel y DAP es diámetro a la altura de pecho (1,30 m).

Las imágenes del dosel fueron capturadas con una cámara comercial Cannon, tomadas desde la base del troco al cenit, todas a una altura de 1,30 m; luego, las imágenes fueron convertidas a blanco y negro, y se procedió a analizar las fotografías de la copa en la versión gratuita de escritorio del Software Gap Ligth Analyzer, para estimar el porcentaje de oclusión del dosel. El software GLA corre y analiza imágenes hemisféricas, motivo por el cual fue necesario realizar una selección y recorte hemisférico de cada una de las 130 imágenes, manteniendo dentro de dicha selección la mayor cantidad de dosel presente en la fotografía como es mostrado en la figura 3.

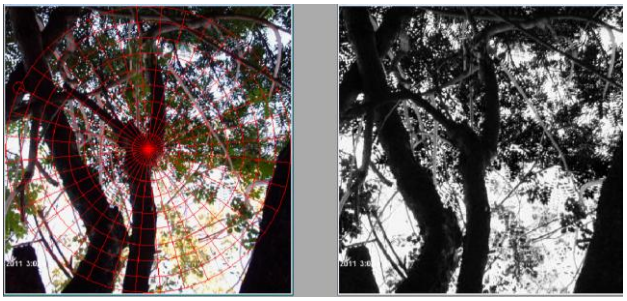


Figura 3. Selección y recorte hemisférico de las fotografías de estudio en el software Gap Light Analyzer

Fue necesario modificar el umbral de registro de cada imagen con el fin de convertir la capa de la derecha lo mas parecido posible a la fotografía original y de esta forma obtener resultados cercanos a la realidad, que permitieran realizar un análisis útil en la toma de decisiones.

Los datos obtenidos de las fotografías fueron compilados en un documento Excel en donde se plasmaron los resultados Canopy openness (% opertura) con el fin de realizar una comparación entre los mismos. El porcentaje de oclusión se obtuvo restando de 100 el porcentaje de opertura.

Análisis estadístico

Se hizo una estadística descriptiva para determinar valores máximos, mínimos, promedio, desviación estándar, Coeficiente de variación, y una estadística multivariada

con las pruebas de análisis de conglomerados y análisis de componentes principales, para hacer un agrupamiento de los árboles según sus características dasométricas. Para ello, se usó el software Infostat

Resultados Y Discusión

Composición arbórea del sistema silvopastoril

Los 130 árboles corresponden a nueve especies. La comunidad está dominada por **Payandé (41 individuos; 32%)**, **Guácimo (31; 24%)** y **Dinde (26; 20%)**. Estas tres especies representan aproximadamente el **76% de los árboles**, por lo que sus características de copa tienen una influencia particularmente importante sobre la cantidad y calidad de sombra del sistema. Las demás especies presentan frecuencias mucho menores: Matarratón 8%, Chipuelo 7%, Angarillo, Guacharaco y Bilibil 3% cada una, y Teca 1% (Figura 4)

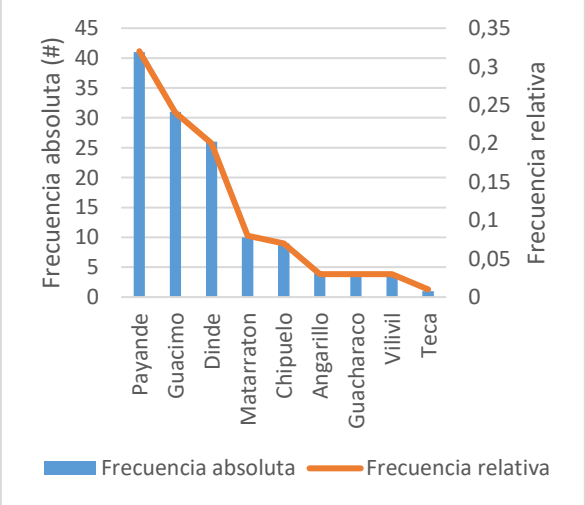


Figura 4 Frecuencia absoluta y relativa de las 9 especies encontradas en el muestreo de 130 individuos del sistema silvopastoril

Existe una heterogeneidad estructural muy alta. La población presenta un DAP promedio de **70,3 cm**, altura total de **13,3 m** y diámetro de copa de **23,1 m**. Sin embargo, los coeficientes de variación son 89,4%, 27,5% y **135,9%**, respectivamente. Por tanto, la mayor heterogeneidad se encuentra precisamente en el diámetro de copa, que es una de las características de mayor interés para proporcionar sombra (Tabla1).

Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables dasométricas analizadas

	DAP (cm)	Altura Total (m)	Diámetro de copa (m)
Media	70,3	13,3	23,1
DE	62,9	3,7	31,3
Min	7,3	5,0	4,5
Max	442,0	21,9	289,9
Q3	86,4	16,2	23,5
Q1	27,4	10,2	7,9
CV	89,4	27,5	135,9

La oclusión promedio por especie varía entre **75,6 y 91,7%**. Una menor oclusión es favorable bajo el supuesto de permitir mayor penetración de radiación al estrato herbáceo. **Guacharaco (75,6%)** presenta claramente el valor más favorable, seguido por **Matarratón (83,0%) y Payandé (84,1%)**. En el extremo contrario están **Teca (90,6%) y Bilibil (91,7%)**, cuyas copas interceptan una proporción considerablemente mayor de la radiación (Tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje promedio de oclusión correspondiente a cada una de las especies de estudio encontradas en la silvopastura de la Granja La Reforma.

	Nombre científico	Oclusión (%)
Payandé	*Pithecellobium dulce*	84,1
Guácimo	*Guazuma ulmifolia*	85,1
Dinde	*Maclura tinctoria*	84,9
Matarratón	Gliricidia sepium	83
Chipuelo	*Zanthoxylum rigidum*	85,2
Angarillo	*Choroleucon bogotense*	86,2

Guacharaco	*Cupania Americana*	75,6
Bilibil	*Guarea guidonia*	91,7
Teca	*Tectona grandis*	90,6

Esto no significa necesariamente que Guacharaco sea la "mejor especie" del sistema, pues para determinarlo se necesita cruzar diámetro de copa × oclusión por especie. Una especie puede tener oclusión baja pero una copa pequeña y, por tanto, proporcionar poca superficie de sombra.
El ACP confirma que diámetro de copa y oclusión representan dimensiones diferentes

El biplot dela figura 5 resulta particularmente informativo. Los dos primeros componentes explican aproximadamente 66% de la variabilidad total: CP1 = 48,7% y CP2 ≈17,3%.

En el gráfico, DAP y diámetro de copa se orientan principalmente hacia CP1, mientras que altura total e índice de oclusión presentan mayor componente vertical. Esto sugiere que el tamaño estructural del árbol —especialmente DAP y copa— y las características relacionadas con oclusión/altura no representan exactamente el mismo gradiente.

Ese resultado es ecológicamente muy útil para tu planteamiento: una copa grande no implica necesariamente una copa muy oclusiva.

En consecuencia, conceptualmente sería posible seleccionar árboles que combinen una copa grande con una oclusión baja.

Esta combinación sería particularmente interesante para un sistema silvopastoril porque permitiría buscar simultáneamente una amplia superficie sombreada para el ganado y una copa suficientemente permeable a la radiación para mantener el estrato herbáceo**.**

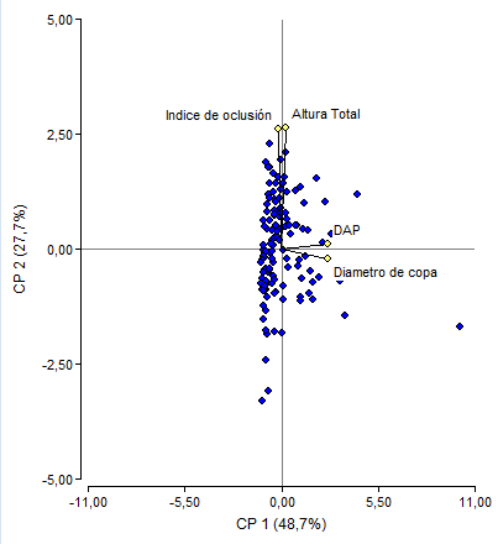


Figura 5 Biplot para el agrupamiento del componente leñoso de un sistema silvopastoril

Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados mediante Ward separó los 130 individuos en tres grupos, y los ANOVA muestran diferencias altamente significativas (**p < 0,0001**) entre ellos para DAP, altura, diámetro de copa e índice de oclusión.

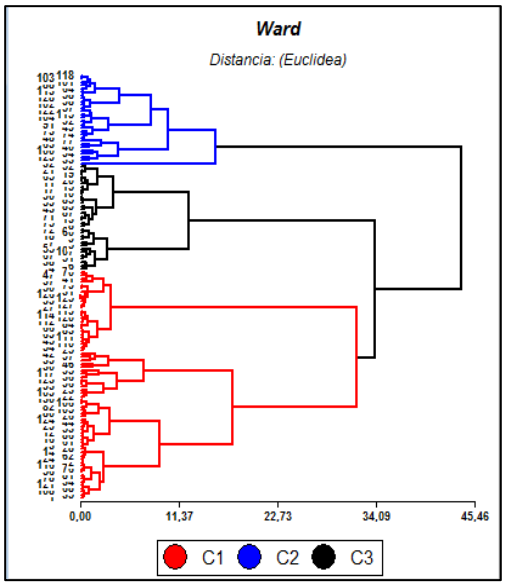


Figura 6 Dendrograma para el agrupamiento del componente leñoso de un sistema silvopastoril

A partir de las medias de Tukey se obtuvo las diferencias entre clúster reportadas en la tabla 3

Table 3. Medidas de estadística descriptiva de variables dasométricos de 130 árboles de una silvopastoril de la Reforma

Conglomerado	Variable	n	Media	D.E.
C1	DAP	70	41,65	28,32
	Altura Total	70	12,28	3,37
	Diametro de copa	70	11,88	8,04
	Indice de oclusión	70	80,90	8,63
C2	DAP	28	162,59	70,53
	Altura Total	28	12,39	3,02
	Diametro de copa	28	61,32	50,52
	Indice de oclusión	28	85,48	6,16
C3	DAP	32	52,33	21,17
	Altura Total	32	16,45	3,03
	Diametro de copa	32	14,04	5,39
	Indice de oclusión	32	91,91	3,22

El conglomerado 2 agrupa árboles de mucho mayor DAP, mayor altura y, especialmente, copas mucho mayores. Estos individuos serían muy valiosos para generar áreas extensas de sombra. Pero existe un *trade-off*: su oclusión también es relativamente alta. En cambio, el conglomerado 1, presenta aproximadamente 81% de oclusión, sustancialmente menor, aunque sus copas son mucho más pequeñas. Es decir, este grupo permitiría mayor transmisión de radiación hacia las gramíneas.

El conglomerado 3 parece menos favorable, porque combina copas relativamente pequeñas con la mayor oclusión, aunque su mayor altura podría representar una ventaja frente a los otros dos conglomerados por las implicaciones en el movimiento de la sombra durante el día.

Análisis multivariado y agrupamiento de especies según características dasométricas

La alta variabilidad observada en el diámetro de copa (CV = 135,9%) y las diferencias en el índice de oclusión evidencian una marcada heterogeneidad estructural del componente arbóreo del sistema silvopastoril. Desde una perspectiva funcional, esta heterogeneidad puede representar una oportunidad para compatibilizar la provisión de sombra para los animales con el mantenimiento de condiciones lumínicas adecuadas para el estrato herbáceo. El análisis multivariado mostró que el diámetro de copa y el índice de oclusión representan dimensiones estructurales parcialmente diferenciadas, indicando que una mayor extensión de copa no necesariamente implica una mayor oclusión. Los conglomerados identificados mediante el método de Ward difirieron

significativamente en DAP, altura total, diámetro de copa e índice de oclusión ($p < 0,0001$). Los individuos del conglomerado 2 presentaron las mayores dimensiones estructurales y, particularmente, los mayores diámetros de copa, característica potencialmente favorable para ampliar la superficie de sombra disponible para los animales. Sin embargo, su mayor oclusión podría reducir la penetración de radiación hacia el estrato herbáceo. En contraste, el conglomerado 1 presentó menor oclusión, condición potencialmente favorable para mantener la disponibilidad de radiación para la fotosíntesis. Estos resultados sugieren que el diseño silvopastoril debería considerar conjuntamente el tamaño y la permeabilidad de las copas, buscando árboles de amplia cobertura lateral, pero con niveles moderados de oclusión, en lugar de maximizar independientemente cualquiera de estas características.

Discusión

La composición y estructura del componente arbóreo evidenciaron una marcada heterogeneidad dentro del sistema silvopastoril evaluado. De los 130 individuos registrados, Payandé, Guácimo y Dinde representaron conjuntamente aproximadamente el 76% de los árboles, mientras que las demás especies presentaron frecuencias considerablemente menores. Asimismo, las variables dasométricas mostraron una amplia variabilidad, particularmente el diámetro de copa, cuyo coeficiente de variación alcanzó 135,9%, frente a 89,4% para el DAP y 27,5% para la altura total. Esta variabilidad indica que, aun dentro de un mismo sistema, los árboles pueden desempeñar funciones contrastantes en términos de cobertura de sombra y modificación del ambiente lumínico del estrato herbáceo.

Desde el punto de vista del bienestar animal, la presencia de árboles y la disponibilidad de sombra constituyen componentes relevantes de los sistemas ganaderos tropicales debido a la elevada carga térmica a la que pueden estar expuestos los bovinos. En condiciones tropicales de Colombia, Osorio-Giraldo et al. (2023) compararon vacas Brahman mantenidas en sistemas con diferente disponibilidad de cobertura arbórea y encontraron una menor temperatura ambiental en el arreglo con mayor disponibilidad de sombra, mientras que los animales en el sistema con menor cobertura presentaron mayor frecuencia respiratoria y dedicaron más tiempo al pastoreo nocturno. Los autores señalan que una oferta adecuada de sombra puede reducir la temperatura ambiental hasta aproximadamente 2 °C. Estos resultados son particularmente relevantes para el presente estudio, no solamente por tratarse de condiciones tropicales colombianas, sino porque entre las especies arbóreas presentes en aquel estudio se encontraba el dinde, especie que representó el 20% de los individuos de nuestro sistema.

Evidencia reciente obtenida en el Cerrado brasileño refuerza esta relación entre sombra y confort térmico. McManus et al. (2026), en un estudio de dos años con 48 vacas lactantes Gyr y Girolando, observaron que los animales mantenidos bajo sombra arbórea presentaron menores temperaturas corporales, frecuencias respiratorias y puntuaciones de jadeo que aquellos expuestos a pleno sol, siendo las diferencias particularmente evidentes cuando el índice temperatura-humedad (THI) superó 74. En conjunto, estas evidencias permiten plantear que los árboles con mayor proyección horizontal de copa podrían desempeñar una función importante al incrementar espacialmente la disponibilidad de sombra para los animales. No obstante, nuestros datos caracterizan la estructura arbórea y no midieron directamente temperatura, THI, comportamiento o respuestas fisiológicas del ganado; por tanto, esta función debe interpretarse como una implicación potencial de la arquitectura de copa, y no como un

efecto demostrado directamente en el presente estudio.

Esta distinción es importante porque el diámetro de copa mostró la mayor variabilidad de las características evaluadas. El promedio fue 23,1 m, con Q1 de 7,9 m, Q3 de 23,5 m y un valor máximo de 289,9 m. Puesto que el diámetro de copa fue estimado mediante una ecuación alométrica dependiente del DAP y no medido directamente en campo, los valores estimados den tomarse con reserva, pue en algunos individuos podría estar sobreestimado. Una estimación extrema podría afectar tanto la media como los análisis multivariados.

Diámetro de copa y oclusión representan funciones complementarias

El análisis de componentes principales aporta elementos relevantes en este sentido. Los dos primeros componentes explicaron aproximadamente dos tercios de la variabilidad observada, y el biplot muestra una mayor asociación del DAP y diámetro de copa con el primer componente, mientras que altura total e índice de oclusión presentan una contribución diferente en el espacio multivariado. Esto sugiere que la extensión física de la copa y su grado de oclusión no representan exactamente la misma propiedad funcional. En otras palabras**,** una copa de gran diámetro no necesariamente debe ser una copa extremadamente cerrada**.**

Esta diferenciación tiene importantes implicaciones silvopastoriles. La copa arbórea cumple al menos dos funciones potencialmente contrapuestas: intercepta radiación y proporciona sombra al animal, pero simultáneamente modifica la cantidad y distribución de radiación fotosintéticamente activa (PAR) disponible para el estrato herbáceo. Vázquez-Ramos et al. (2025), estudiando *Brachiaria* bajo árboles dispersos y a pleno sol en Chiapas, México, demostraron que el componente arbóreo modificó variables microclimáticas como temperatura del aire, humedad, temperatura del suelo, déficit de presión de vapor y PAR.

Los resultados del estudio de Poveda Santos (2021) indican que la arquitectura del dosel arbóreo incide en el microclima. A nivel general, bajo la sombra proyectada del árbol se genera una reducción aproximada de 4°C de la temperatura del aire y un aumento de las 6,03 unidades de la humedad relativa, al igual que, un aumento de 0,15 m/s de la velocidad del viento. La sombra proyectada por los árboles de tamaños (pequeño, mediano y grande) presentaron una disminución de la temperatura (3,18 °C, 4,19 °C y 3,43 °C), respectivamente, y un aumento de la humedad relativa (5,30 unidades, 7,31 unidades y 5,52 unidades). Las especies de tamaño mediano presentan un mejor resultado de la regulación del microclima, los cuales, representan un aumento de la humedad relativa de 7,31 unidades y una disminución de la temperatura de 4,19 °C.

Por consiguiente, la arquitectura de copa no debería interpretarse exclusivamente desde la perspectiva de la cantidad de sombra producida, sino también de la calidad lumínica y del microclima que permanece debajo de ella**.**

Esta consideración permite reinterpretar los valores de oclusión encontrados en el presente estudio. La oclusión promedio varió desde 75,6% en Guacharaco hasta 91,7% en Bilibill. Matarratón presentó 83,0%, Payandé 84,1%, Dinde 84,9%, Guácimo 85,1%, Chipuelo 85,2%, Angarillo 86,2% y Teca 90,6%. Bajo el supuesto funcional planteado para este estudio, una menor oclusión representa potencialmente una mayor posibilidad de transmisión de radiación hacia el estrato herbáceo. Sin embargo, estos resultados no deberían interpretarse como

evidencia de que la menor oclusión posible sea necesariamente la condición óptima.

La respuesta de las gramíneas tropicales a la sombra es más compleja. Gomes et al. (2020), trabajando con *Urochloa brizantha* cv. Marandu en un sistema silvopastoril con *Eucalyptus urograndis* en Brasil, demostraron una considerable variabilidad espacial y estacional de PAR dependiendo de la distancia y posición respecto a las hileras arbóreas. Además, el sombreado modificó características del dosel del pasto, pero no necesariamente produjo una respuesta proporcionalmente negativa en todas las variables del estrato herbáceo. Esto evidencia la capacidad de las gramíneas tropicales tolerantes a sombra para modificar su estructura foliar y aprovechar ambientes con radiación moderadamente reducida.

Resultados similares fueron reportados por Casanova-Lugo et al. (2022) en sistemas ganaderos del trópico húmedo de México con árboles dispersos y *Brachiaria brizantha*. Es particularmente relevante que uno de los sistemas estudiados incluyera *Guazuma ulmifolia* (Guácimo), una de las especies predominantes en el presente estudio. Los autores encontraron que el efecto de la sombra sobre la productividad del pasto dependió del contexto ambiental y de la época, demostrando que la presencia de árboles no implica necesariamente una reducción uniforme de la producción forrajera.
Existe un compromiso entre sombra y producción forrajera

No obstante, en términos generales es importante entender la incidencia de la presencia del componente arbóreo en la pastura, ya que la tolerancia del pasto a la sombra tiene límites. Un meta-análisis muy reciente de sistemas silvopastoriles tropicales y subtropicales de Brasil analizó 45 artículos y encontró que, en promedio, la tasa de acumulación de forraje fue aproximadamente 30% menor en sistemas silvopastoriles que en sistemas pastoriles sin árboles**,** aunque la magnitud del efecto dependió de las condiciones ambientales y fue diferente entre regiones tropicales y subtropicales. (Corteze et al., 2026) Este resultado es especialmente importante para interpretar los elevados valores de oclusión encontrados en algunos individuos y especies del presente estudio.

Por lo tanto, los valores superiores a 90% registrados para Bilibil y Teca podrían representar condiciones de fuerte interceptación lumínica debajo de algunas copas. Sin embargo, no es posible establecer únicamente con nuestros datos que esos valores reduzcan la producción de forraje, ya que no se midieron PAR bajo copa, biomasa, tasa de crecimiento o composición botánica en función de cada árbol. Para demostrar esa relación sería necesario relacionar directamente el índice de oclusión con la radiación incidente bajo cada copa y posteriormente con variables productivas del estrato herbáceo.

Los conglomerados revelan diferentes estrategias estructurales

El análisis de conglomerados proporciona evidencia adicional para esta interpretación. El método de Ward diferenció tres grupos de individuos y los análisis de varianza mostraron diferencias altamente significativas entre conglomerados para DAP, altura total, diámetro de copa e índice de oclusión ($p < 0,0001$). Esto indica que la población arbórea no constituye una estructura homogénea, sino que contiene diferentes tipos arquitectónicos potencialmente asociados con distintas funciones dentro del sistema silvopastoril.

De acuerdo con las medias presentadas en los análisis, el conglomerado C2 reúne los individuos de mayores dimensiones, particularmente en DAP, altura y diámetro de copa. Estos árboles tendrían potencial para

generar superficies mayores de sombra. Sin embargo, presentan también una oclusión relativamente elevada. El conglomerado C1, por el contrario, presenta menor oclusión y copas de menor tamaño, mientras que el tercer conglomerado C3 combina copas comparativamente pequeñas con los mayores valores de oclusión.

Este patrón pone de manifiesto que cantidad de sombra potencial y densidad de copa deben considerarse conjuntamente. Un árbol de copa pequeña y alta oclusión podría producir sombra intensa pero sobre una superficie relativamente reducida; uno de copa muy extensa y elevada oclusión podría proporcionar una gran superficie sombreada, pero disminuir considerablemente la radiación disponible para el pasto; mientras que una copa amplia y de oclusión intermedia podría representar una configuración particularmente interesante para compatibilizar ambas funciones; esto mejoraría si los árboles son de mayor altura.
De esta manera, los resultados sugieren que el diseño y manejo del componente arbóreo de sistemas silvopastoriles no debería orientarse exclusivamente hacia la maximización de cobertura arbórea. Los beneficios fisiológicos observados en bovinos bajo sombra en Colombia y Brasil demuestran claramente la importancia de disponer de refugios térmicos dentro de los potreros. (Osorio-Giraldo, et al., 2023) Paralelamente, la evidencia sobre *Urochloa/Brachiaria* demuestra que la modificación del ambiente lumínico afecta la estructura y productividad del estrato herbáceo y que existe un límite a partir del cual el sombreado puede representar una restricción productiva. (Gómez et al, 2020)

En este contexto, los resultados del ACP y del análisis de conglomerados respaldan la conveniencia de considerar simultáneamente diámetro de copa y oclusión como atributos funcionales del componente arbóreo. Una arquitectura potencialmente favorable sería aquella caracterizada por una amplia extensión horizontal de copa acompañada de una oclusión moderada, capaz de distribuir espacialmente la sombra necesaria para disminuir la exposición directa del ganado a la radiación solar, manteniendo al mismo tiempo cierto grado de transmisión de radiación hacia el estrato herbáceo.

Esta interpretación constituye una hipótesis derivada de la estructura observada y debe validarse experimentalmente. Un siguiente estudio debería medir simultáneamente, debajo de árboles representativos de los diferentes conglomerados, PAR, temperatura del aire y del suelo, temperatura de globo negro o índices de carga térmica, biomasa y composición del forraje y utilización de la sombra por los animales. Esto permitiría determinar si los grupos arquitectónicos identificados estadísticamente corresponden efectivamente a ambientes funcionalmente diferentes para los componentes animal y vegetal.

En síntesis, la elevada variabilidad dasométrica y las diferencias de oclusión observadas entre los 130 árboles no necesariamente constituyen una limitación del sistema; por el contrario, podrían representar una fuente de heterogeneidad funcional que permita generar simultáneamente ambientes de sombra y espacios con mayor disponibilidad de radiación. El reto de manejo no sería maximizar independientemente el diámetro de copa ni minimizar la oclusión, sino identificar y conservar configuraciones arbóreas que proporcionen un equilibrio entre confort térmico animal y disponibilidad lumínica para la producción de forraje**.** Este enfoque permitiría interpretar la arquitectura del componente arbóreo como una herramienta de diseño del sistema silvopastoril y no simplemente como una característica descriptiva de su vegetación.

Conclusiones

La heterogeneidad estructural del componente arbóreo constituye un atributo funcional relevante del sistema silvopastoril**.** Los árboles evaluados presentaron una elevada variabilidad dasométrica, particularmente en el diámetro de copa. Esta diversidad estructural puede favorecer la coexistencia de zonas con diferentes niveles de sombra y disponibilidad de radiación, en lugar de representar necesariamente una limitación del sistema.

El diámetro de copa, la altura del árbol y la oclusión del dosel deben considerarse de manera conjunta para el manejo del componente arbóreo**.** El análisis de componentes principales mostró que estas variables representan dimensiones estructurales parcialmente diferenciadas; por tanto, una copa de gran tamaño no implica necesariamente una mayor oclusión. Esto permite plantear como configuración potencialmente favorable aquella que combine una amplia cobertura lateral con una oclusión moderada, buscando proporcionar sombra al ganado y mantener simultáneamente la entrada de radiación al estrato herbáceo.

Las especies y los grupos estructurales presentan diferencias importantes en su capacidad potencial para regular la sombra**.** El conglomerado C2 reunió árboles con copas considerablemente mayores, mientras C1 presentó menor oclusión y C3 combinó copas relativamente pequeñas con los mayores niveles de oclusión.

Los resultados permiten orientar la toma de decisiones del componente leñoso en la silvopastura, pero no demostrar directamente efectos sobre el ganado o la producción de forraje. Por ello, la hipótesis de que copas amplias y moderadamente oclusivas logran un mejor equilibrio entre confort térmico y producción forrajera requiere validación experimental mediante mediciones simultáneas de los componentes arbóreo, herbáceo y animal.

Agradecimientos

A Anderson Castila por el levantamiento de datos dasométricos en el marco del proyecto “Hábitos y distribución de pastoreo de rumiantes en sistemas ganaderos extensivos”

Referencias

Casanova-Lugo, F., Villanueva-López, G., Alcudia-Aguilar, A., Nahed-Toral, J., Medrano-Pérez, O. R., Jiménez-Ferrer, G., Alayón-Gamboa, J. A., & Aryal, D. R. (2022). Effect of tree shade on the yield of Brachiaria brizantha grass in tropical livestock production systems in Mexico. Rangeland Ecology & Management, 80, 31–38. DOI: 10.1016/j.rama.2021.09.006. (ScienceDirect)

Corteze, A. P., et al. (2026). Forage Responses and Beef Cattle Performance in Silvopasture Systems: A Meta-Analysis of Tropical and Subtropical Regions of Brazil. Grass and Forage Science, 81(3), e70071. DOI: 10.1111/gfs.70071. (Wiley Online Library)

Gomes, F. J., Pedreira, B. C., Santos, P. M., Bosi, C., Lulu, J., & Pedreira, C. G. S. (2020). Microclimate effects on canopy characteristics of shaded palisadegrass pastures in a silvopastoral system in the Amazon biome of central Brazil. European Journal of Agronomy, 115, 126029. DOI: 10.1016/j.eja.2020.126029. (ScienceDirect)

McManus, C., Pimentel, F., Junqueira, V. S., et al. (2026). Shade matters: Heat stress alleviation in Gyr and Girolando cows through silvopastoral management in tropical conditions. International Journal of Biometeorology, 70, 27. DOI: 10.1007/s00484-025-03063-7. (Springer Nature)

Osorio-Giraldo, J. F., Mahecha-Ledesma, L., Moncada-Angel, A. H., & Carmona-Agudelo, J. C. (2023). Comportamiento y respuesta fisiológica de vacas Brahman de cría en arreglos silvopastoriles. Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú, 34(3), e22463. DOI: 10.15381/rivep.v34i3.22463. (SciELO Perú)

Vázquez-Ramos, C. I., Salas-Marina, M. A., Cruz-Macías, W. O., & Rodríguez-Larramendi, L. A. (2025). Environmental characterization in a silvopastoral system in the Frailesca region of Chiapas, Mexico. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 28, Article 067. (Revista CCBA)

Almazán González, J. A. (2013). Estimación de almacenamiento de carbono en el suelo de conservación del distrito federal mediante el uso de datos Lidar aerotransportado. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "ING. JORGE I. TAMAYO", A. C.

Frazer, G., Canham, C., & Lertzman, K. (1999). Gap light analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour sheye photographs, users manual and program documentation. Burnaby: Simon Fraser University.

Kimmins, J. (1987). Forest ecology. A foundation for sustainable management. New Jersey, USA: Prentice Hall.

Maecha, L. (2003). Importancia de los sistemas silvopastoriles y principales limitantes para su implementación en la. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 9

Pezo, D & Ibrahim, M.. (1998). Sistemas silvopastoriles (No. 2). Bib. Orton IICA/CATIE.

Potter, E., J. Wood, and C. Nicholl. (1996). SunScan canopy analysis system user manual SS1-UM-1.05, Delta-T devices, Cambridge, UK

Poveda Santos, Yeison Arturo, Carvalho, Laíssa Ferreira, & Martini, Angeline. (2021). Influencia del tamaño de los árboles en la mejora del microclima urbano en Viçosa-MG, Brasil. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 18(43), 53-61. https://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v19i43.5809

Promis, A. (2013). Medición y estimación del ambiente lumínico en el interior del bosque. Una revisión. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, *19*(1), 139-146. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.02.014

Somarriba, E., Zamora, R., Barrantes, J., Malek, M., Vargas, E., Sinclair, F., & Quesada, F. (2020). Shade Motion: tutorial. El análisis de patrones de sombras de árboles. Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Subvención, R. H. (1997). Partición de la radiación biológicamente activa en las copas de las plantas. Revista Internacional de Biometeorología, 26-40.

Urrea, M. J., Vera Rodríguez, J. M., & Mora Delgado, J. (2016). Comparación de resultados de modelación de sombras empleando Qgis y ShadeMotion en un potrero arbolado. Agroforestería Neotropical, 8 (1), 41-48