

UNSE

Universidad Nacional
de Santiago del Estero

Variabilidad de la madera en diferentes poblaciones de *Prosopis alba*: influencia en la densidad básica, colorimetría y anatomía del leño



Ana Belen Cisneros

TESIS DOCTORAL

Facultad de Ciencias Forestales

Santiago del Estero, Argentina

2020



ISBN 978-987-1676-92-7



Cisneros, Ana Belén

Variabilidad de la madera en diferentes poblaciones de *Prosopis alba*: influencia en la densidad básica, colorimetría y anatomía del leño : tesis doctoral FCF UNSE / Ana Belén Cisneros ; dirigido por Juana Graciela Moglia ; Silvana Nisgoski. - 1a ed. - Santiago del Estero : Universidad Nacional de Santiago del Estero - UNSE. Facultad de Ciencias Forestales, 2020.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-1676-92-7

1. Colorimetría. 2. Algarrobo. 3. Propiedades de la Madera. I. Moglia, Juana Graciela, dir. II. Nisgoski, Silvana, dir. III. Título.

CDD 634.98



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO
Facultad de Ciencias Forestales



Variabilidad de la madera en diferentes poblaciones de *Prosopis alba*: influencia en la densidad básica, colorimetría y anatomía del leño

TESIS
PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS FORESTALES

POR

Cisneros Ana Belén

Ing. Forestal - Universidad Nacional de Santiago del Estero - 2015

Directora de tesis: **Dra. Juana Graciela Moglia**

Codirector: **Dra. Silvana Nisgoski**

Santiago del Estero, Argentina.
Año 2020



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO
Facultad de Ciencias Forestales



FACULTAD DE
CIENCIAS FORESTALES
DIRECCIÓN DE POSGRADO



UNSE
Universidad Nacional
de Santiago del Estero

TERMINO DE APROBACION

TESIS DOCTORAL

En la ciudad de Santiago de Estero, a los 12 días de marzo de 2020, siendo las 10:00 horas, se reúne, en la sede central de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, el Tribunal constituido por los profesores Dra. Graciela Bolzón (Universidad Federal de Paraná, UFPR), Dra. Stella Marys Bogino (Universidad Nacional de San Luis, UNSL), y Dra. Ana María Giménez (Universidad Nacional de Santiago del Estero, UNSE), y como jurado suplente el Dr. Publio A. Araujo (Universidad Nacional de Santiago del Estero, UNSE) para evaluar la Tesis Doctoral de la Ing. Ana Belén Cisneros, DNI: 34.995.623, en la Defensa de Tesis, convocada mediante Resolución FCF N°099/2020.

La Tesis titulada: "Variabilidad de la madera en diferentes poblaciones de *Prosopis alba*: influencia en la densidad básica, colorimetría y anatomía del leño", fue dirigida por la Dra. Juana Graciela Moglia (Universidad Nacional de Santiago del Estero - UNSE) y co dirigida por la Dra. Silvana Nisgoski (Universidad Federal de Paraná - UFPR).

Después de evaluar la Tesis e interrogar a la doctoranda, el Jurado deliberó por la Aprobación con la calificación diez (10).

Jurado de Tesis

Firma
Dra. Graciela Bolzón

Firma
Dra. Stella Marys Bogino

Firma
Dr. Ana María Giménez

Firma
Dr. Publio Araujo

Santiago del Estero,de de 2020



A MI GRAN DIOS Y A LA BELLA FAMILIA QUE ME REGALÓ

AGRADECIMIENTOS

Son muchísimas las personas e instituciones que contribuyeron directamente e indirectamente para que este proyecto se concrete, a ellos mis más sinceros reconocimientos y agradecimientos.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por brindarme la gran posibilidad de formarme profesionalmente y por financiar este estudio a través de una Beca.

A mi directora de beca y tesis, Dra. Juana Graciela Moglia, quien desde el año 2011 me acepto, me guio y contribuyó significativamente en mi formación académica día a día, con ideas constructivas y superadoras, a quien le agradezco por su constante paciencia, por su buena energía, alegría y proactividad que la caracterizan, además por ser una gran compañera, amiga y consejera. Por facilitarme todos los medios necesarios para capacitarme mediante sus numerosos proyectos, en distintos cursos de posgrado, participar en congresos, jornadas, talleres, revistas científicas. A ella mi infinito respeto y agradecimientos.

A la Dra. Ana María Giménez que junto a mi directora, me recibieron en su bella cátedra con tanta predisposición y amabilidad que las caracterizan. Además por todo el apoyo brindado con numerosos proyectos de investigación y equipamientos de su cátedra durante mi formación y desarrollo de tesis.

Al profesor Dimas Agostinho da Silva, Regina Trivelino por su amistad y hospitalidad, durante mi estadía en Brasil para la toma de datos que constituyen parte de esta tesis.

Al profesor Ivan Crespo Silva por el apoyo y sus grandiosos consejos para desarrollar esta tesis, y contribuir en gran medida en el desarrollo del nuevo programa de posgrado.

A la Profesora Dra. Silvana Nisgoski y Dra. Graciela Bolzón por recibirme en su laboratorio, donde se pudo realizar la toma de datos de las muestras de madera en relación a los espectros NIR y colorimetría.

A Dr. Mariano Córdoba, por guiarme durante el análisis de datos.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero y al Programa de Posgrado de la Facultad de Cs Forestales, por permitirme lograr este objetivo.

A mis compañeros del grupo del Laboratorio de Anatomía de la Madera (LAM), por su gran compañerismo.

Al Ing. Diego López Lauenstein y Dr. Aníbal Verga por colaborar en las tareas de identificación de rodales semillero selectos.

A la Secretaria de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Santiago del Estero por subsidios a Programas y Proyectos.

A Mirta Spocetti, por colaborar en la preparación de los preparados microscópicos.

A mi bella Susana Bogino y Carlos Carignano, por hacerme parte de su familia y esperarme en infinitos momentos con palabras alentadoras en su hogar, durante estos últimos años de formación.

Un infinito agradecimiento a mi bella FAMILIA, en especial a mis padres AMÉRICO y ROSA DIGNA, hermanos VICTORIA y FELIPE por sus consejos, enseñanzas y ayuda brindada en todo momento. A mi amigo y compañero GUILLERMO CARIGNANO por la paciencia y por el apoyo incondicional durante todo el desarrollo de este gran proyecto de formación.

A MI GRAN DIOS, el héroe de mi corazón y de mis sueños, mi eterna gratitud para con él por permitir un logro más en mi vida.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis	4
1.2. Objetivo general	4
1.3. Objetivos específicos.....	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Consideraciones generales sobre <i>Prosopis alba</i>	5
2.2. Características de las poblaciones de <i>Prosopis</i> (rodiales).....	6
2.3. <i>Prosopis alba</i> en la industria.....	7
2.4. Principios básicos sobre colorimetría	8
2.4.1. Importancia del color de la madera	10
2.4.2. Estudios sobre colorimetría de madera.....	11
2.5. Densidad básica en el leño.....	13
2.6. Aspectos Anatómicos en la madera de <i>Prosopis alba</i>	15
2.7. Correlación entre densidad básica, color, y anatomía del leño	17
3. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1. Área de estudio	19
3.1.1. Caracterización de los sitios de estudio	20
3.2. Obtención de muestras de madera.....	23
3.3. Determinación de la densidad básica	25
3.4. Medición del color	26
3.4.1. Preparación de muestras	26
3.4.2. Determinación del color	27
3.4.3. Variación del color entre rodales nativos y Plantación.....	29
3.5. Determinación de anatomía del leño	30
3.6. Análisis estadístico	31
3.6.1. Color	31
3.6.2. Densidad básica y rasgos microscópicos.....	31
3.6.3. Análisis de correlación	32
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	33
4.1. Colorimetría en la madera de <i>Prosopis alba</i>	33
4.2. Variación de rasgos colorimétricos en la madera de <i>Prosopis alba</i> , entre sitios y dentro del árbol.	42
4.3. Correlación entre parámetros colorimétricos	51
4.4. Variación del color de la madera	55

4.4.1 Variación del color de la madera dentro del árbol	55
4.4.2. Variación del color de la madera entre rodales nativos y plantación	58
4.4.3. Variación del color de la madera entre sitios	61
4.5. Densidad de la madera: entre sitios y dentro del árbol	65
4.6. Correlación de la densidad básica con el color de la madera y propiedades dasométricas del árbol	70
4.7. Anatomía de madera	75
4.7.1. Parámetros microscópicos por sitio y dentro del árbol	75
4.8. Correlación de la anatomía del leño con la densidad básica	86
4.8.1. Consideraciones sobre la densidad y anatomía del leño.....	91
4.9. Correlación de la anatomía del leño con parámetros colorimétricos	92
5. CONCLUSIONES	95
6. CONSIDERACIONES FINALES	97
BIBLIOGRAFÍA.....	98
ANEXO I.....	110
ANEXO II.....	116

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Rasgos dendrométricos en individuos muestreados de <i>Prosopis alba</i> por sitio	24
Tabla 2	Clasificación de la variación total del color (ΔE^*) de maderas	30
Tabla 3	Estadística descriptiva de los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) en las distintas regiones de la madera de <i>Prosopis alba</i>	34
Tabla 4	Valores promedios y coeficiente de variación (CV%) de los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) según tipo de formación y región de la muestra de madera.....	37
Tabla 5	Variación del color (ΔE) y variación de parámetros colorimétricos (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) entre albura y duramen.....	55
Tabla 6	Variación del color (ΔE) y de parámetros colorimétricos (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) entre albura y duramen discriminado por sección.....	56
Tabla 7	Variación del color (ΔE) y de los parámetros del color (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) entre los sitios muestreados.	57
Tabla 8	Variaciones de los parámetros colorimétricos y del color de las muestras de la madera de <i>Prosopis alba</i> de rodal natural respecto a la plantación	59
Tabla 9	Variaciones entre los parámetros colorimétricos de las muestras de la madera de <i>Prosopis alba</i> de rodal natural respecto a la plantación según la sección de estudio.....	60
Tabla 10	Variaciones entre los parámetros colorimétricos en muestras de rodales naturales respecto a muestras de plantación discriminado por sitio.....	62
Tabla 11	Medidas de resumen para densidad básica por sitio	65
Tabla 12	Correlaciones entre parámetros colorimétricos del duramen (L^* , a^* , b^* , C , h^*), propiedades dasométricas del árbol (edad, Ht: altura total, DAP: diámetro a la altura del pecho, Hf: altura de fuste, Vc: volumen de copa) y densidad básica (DB).....	72
Tabla 13.	Estadística descriptiva para rasgos anatómicos en la madera de <i>Prosopis alba</i> , discriminado por sitio	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Distribución del género <i>Prosopis</i> a nivel mundial..	5
Figura 2	Recorrido de un rayo de luz a través de células de madera llenas de aire. ..	9
Figura 3	Representación del sistema colorimétrico CIELab 1976.....	9
Figura 4	Ubicación del Chaco Americano en Sudamérica.....	20
Figura 5	Sitios de muestreo.	23
Figura 6	Esquema de obtención de muestras para densidad básica.....	24
Figura 7	Probetas de madera para medición del color	24
Figura 8	Probetas empleadas para densidad básica.....	25
Figura 9	Peso anhidro de probetas	25
Figura 10	Obtención de volumen verde.....	26
Figura 11	Probetas de madera lijadas.....	27
Figura 12	Conservación de probetas en ambientes sin luz	27
Figura 13	Espectrofotómetro Konica Minolta CM-5	28
Figura 14	Sistema CIELab 1976	29
Figura 15	Curvas de reflectancia en las distintas regiones de la madera en función de las longitudes de onda.....	35
Figura 16	Valores promedios y coeficientes de variación (CV%) de los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^*) del duramen de <i>Prosopis alba</i>	366
Figura 17	Valores medios de los parámetros colorimétricos por región de muestra de madera según la secciones de estudios	36
Figura 18	Curvas de reflectancia de la madera de algarrobo blanco (<i>Prosopis alba</i>) en función de las longitudes de onda, discriminado por secciones lateral (L) y transversal (X)	41
Figura 19	Medias ajustadas y errores estándares para la interacción <i>sitio x región</i> del parámetro luminosidad (L^*) mediante el test de fisher ($\alpha=0,05$)	43
Figura 20	Medias ajustadas y errores estándares para la interacción <i>sección x región</i> del parámetro de luminosidad (L^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$)	45

Figura 21	Medias ajustadas y errores estándares para la interacción <i>sitio x región</i> del pigmento rojo (a^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).....	46
Figura 22	Medias ajustadas y errores estándares para la interacción <i>sección x región</i> del pigmento rojo (a^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).....	47
Figura 23	Medias ajustadas y errores estándares para la interacción <i>sitio x región</i> del pigmento amarillo (b^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$)	48
Figura 24	Medias ajustadas y errores estándares para la interacción <i>sitio x región</i> de la saturación (C) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).....	49
Figura 25	Medias ajustadas y errores estándares para la interacción <i>sitio x región</i> (a) y <i>sección x región</i> (b) del ángulo de tinta (h^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$)	50
Figura 26	Color en la superficie de madera según el sitio y la región del leño.....	51
Figura 27	Diagrama de dispersión entre parámetros colorimétricos en las tres regiones de estudio.....	52
Figura 28	Contrastes entre albura y duramen en mesas fabricadas en nogal, originarios de Indonesia.....	56
Figura 29	Variación del color dentro del árbol, en muestra de Los Arias, Santiago del Estero.....	57
Figura 30	Variación del color (ΔE^*) entre albura y duramen en los distintos sitios de estudio.....	58
Figura 31	Niveles de reflectancias en función de la longitud de onda de rodales nativos y plantación en las dos regiones de estudio	61
Figura 32	Curvas de variación de luminosidad L^* (a), pigmento rojo (a^*) (b), pigmento amarillo (b^*) (c) y variación del color (ΔE^*) (d) en <i>Prosopis alba</i> , según el sitio y la sección.....	63
Figura 33	Curvas de reflectancia en las distintas regiones de la muestra de madera (albura, duramen y médula) para los distintos sitios de estudio.	64
Figura 34	Densidad del leño discriminado por sitio y distancias a la médula.....	66
Figura 35	Densidad básica en función de las distancias a la médula.	67
Figura 36	Densidad básica de la madera en función de la precipitación media anual (a) temperatura media anual (b) y evapotranspiración potencial (c)	68
Figura 37	Atlas de cambio climático temperatura (a) y precipitación (b).....	69

Figura 38	Relación entre la densidad básica con el DAP (a) y relación entre el DAP con la edad.....	71
Figura 39	Relación entre la densidad básica y las variables de color (L, a*, b* y C).....	73
Figura 40	Relación entre el ángulo de tinta (h*) y la edad del árbol.....	74
Figura 41	Sección transversal y longitudinal radial del leño <i>Prosopis alba</i> con fluorescencia	81
Figura 42	Relación entre diámetro y frecuencia de vasos	82
Figura 43	Índice de vulnerabilidad por sitio	83
Figura 44	Índice de vulnerabilidad en función de la frecuencia de vasos en <i>Prosopis alba</i> en distintos sitios de la Región Chaqueña Argentina	84
Figura 45	Correlación de la densidad básica con el diámetro de vasos (a), longitud de radios (b) y ancho de radios (c).	86
Figura 46	Correlación de la densidad básica con el porcentaje de parénquima (a), fibras (b) y radios (c).	88
Figura 47	Correlación entre la densidad básica con vasos múltiples largos (a) y vasos múltiples largos con la frecuencia de vasos (b).....	90
Figura 48	Correlación de la densidad básica con radios biseriados (a), triseriados (b) y múltiples (c).	91
Figura 49	Relación entre la luminosidad de las muestras (L*) con la frecuencia de vasos (a), porcentaje de vasos múltiples largos (b) y porcentaje de parénquima axial (c)	93
Figura 50	Relación entre el ángulo de tinta (h*) y la frecuencia de vasos.....	94

RESUMEN

Prosopis alba es una de las especies forestales nativas de mayor importancia en Argentina. Comercialmente es muy valorada por las excelentes propiedades físico-mecánicas de su madera: muy estable, densa y de baja contracción volumétrica. En América del Sur, ocupa una amplia área de dispersión, sobre todo en el centro norte de Argentina. Con gran variedad de ambientes que produjeron diferenciaciones morfológicas, las cuales pueden o no estar relacionadas a diferencias en rasgos asociados a la calidad de la madera. Para estudiar la variabilidad de rasgos relacionados a la calidad de madera en diferentes ambientes, tales como: la densidad básica, colorimetría de la madera y características anatómicas, para estándares de calidad de madera, se seleccionaron tres rodales semilleros de bosques nativos (de poblaciones puras) y una plantación, de la región Chaqueña, Argentina. Fueron seleccionados seis individuos por sitio, tanto en los rodales nativos (Los Arias, Santiago del Estero; Villa Ángela, Chaco; Isla Cuba, Formosa) como en la plantación (Los Arias, Santiago del Estero) con características fenotípicas superiores. Se empleó un modelo lineal mixto, donde el sitio fue considerado como efecto fijo y el árbol como efecto aleatorio. Los rasgos medidos fueron la densidad básica de la madera, colorimetría cuantitativa con el sistema CIELab1976 y rasgos anatómicos del xilema. Los resultados muestran variaciones significativas entre sitios y dentro del árbol, en la mayoría de los rasgos analizados. Todos los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C y h^*) fueron positivos y se ubicaron en el primer cuadrante del sistema CIELab. El color de la madera fue entre un 5,71 y 8,03%, más oscuro en sitios de mayor precipitación (Villa Ángela, Chaco e Isla Cuba, Formosa, respectivamente). Las diferencias del color en la madera tanto dentro del árbol, como en todos los rodales nativos respecto a la plantación fueron de apreciable a muy apreciables para el ojo humano >3 . Los rodales nativos, de sitios más áridos tendieron a mostrar las densidades básicas más altas, 0,61-0,65 g/cm³, a mayores distancias desde la médula, la interacción *sitio x distancias* fue significativa. La correlación entre la densidad y características anatómicas, dendrométricas y parámetros colorimétricos fueron estadísticamente significativas en ciertos rasgos. Las correlaciones fueron de moderadas a bajas con una variación entre -0,70 a 0,68 ($p < 0,05$). Sin embargo, se observaron tendencias claras de aumento o disminución según las características evaluadas. Los resultados indican que el color y características anatómicas en la madera de *P. alba* son rasgos de calidad que puede variar ampliamente entre sitios y dentro del árbol. Las maderas de mayor densidad básica tienden a ser las más oscuras.

Palabras claves: colorimetría, densidad de la madera, sistema CIE-L*a*b*, *Prosopis alba*, características anatómicas, rodales semilleros, dendroplasticidad.

ABSTRACT

Prosopis alba is one of the most important native forest species in Argentina. Commercially it is highly valued for the excellent physical-mechanical properties of its wood: very stable, dense and low volumetric contraction. In South America, it occupies a wide area of dispersion, especially in the north center of Argentina. With a great variety of environments that produced morphological differentiations, which may or may not be related to differences in traits associated with the quality of the wood. To study the variability of features related to wood quality in different environments, such as basic density, wood colorimetry and anatomical characteristics, for wood quality standards, three seed stands of native forest were selected (from pure populations) and a plantation, from the Chaqueña region, Argentina. Six individuals were selected by site both in the native stands (Los Arias, Santiago del Estero; Villa Ángela, Chaco; Isla Cuba, Formosa) and in the plantation (Los Arias, Santiago del Estero) with superior phenotypic characteristics. A mixed linear model was used, where the site was considered as fixed effect and the tree as random effect. The traits measured were the basic wood density, quantitative colorimetry with the CIELab1976 system and anatomical features of the xylem. The results show significant variations among sites, and within the tree, in most of the traits analyzed. All the colorimetric parameters (L^* , a^* , b^* , C and h^*) were positive and are in the first quadrant of the CIELab system. The wood color was between 5.71 and 8.03% being darker in sites of higher rainfall (Villa Ángela, Chaco and Isla Cuba, Formosa, respectively). The differences in wood color both within tree as for all native stands with respect to plantation were appreciable to very appreciable for the human eye. The native stands of more arid sites tended to show the highest basic densities, 0.61-0.65 g/cm³, at greater distances from the pith, the *site x distances* interaction was significant. The correlation between density and anatomical, dendrometric characteristics and colorimetric parameters were statistically significant in certain traits. The correlations were moderate to low with a variation between -0.70 and 0.68 ($p < 0.05$). However, clear trends of increase or decrease were observed according to the characteristics evaluated. The results indicate that the color and anatomical characteristics of *P. alba* wood are quality traits that can vary widely between sites and within the tree. Woods with higher basic density tend to be being darker.

Key words: colorimetry, wood density, CIELab system, *Prosopis alba*, anatomical characteristics, seed stands, dendroplasticity.

1. INTRODUCCIÓN

El Gran Chaco es la región con bosque seco continuo más grande de Sudamérica y ocupa 500.000 km² Hueck (1966), es la región forestal más importante de América del Sur en el sentido económico. Se encuentra constituido por un mosaico de ambientes donde se emplazan especies autóctonas de gran valor, no solo maderero sino también de interés alimenticio, medicinal, forrajero, tintóreo, entre otros (Fagg y Stewart, 1994; Giménez *et al.*, 1998; Giménez *et al.*, 2001; Cisneros y Moglia, 2017). Las especies del género *Prosopis*, se destacan por ser pioneras, con alto potencial biológico para la diseminación, crecen en sitios áridos y semiáridos, con suelos salinos y degradados (López, 2005; Villagra *et al.*, 2010).

De todas las especies del género *Prosopis*, sólo unas pocas son de gran relevancia económica, entre ellas el algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb.). Comercialmente es una especie muy valorada por su madera (Giménez *et al.*, 2001). El uso extendido en la industria del mueble, se debe a las excelentes propiedades físico-mecánicas de su madera: muy estable, densa, de baja contracción volumétrica y alta durabilidad natural (Turc y Cutter, 1984; Pometti *et al.*, 2009; Araujo *et al.*, 2003; Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2003).

En Argentina la producción total de madera de bosques nativos en el año 2016 fue de 3.743 mil toneladas, registrando una leve caída con respecto al 2015 (Var. i.a. -1,5%) (Ministerio de Hacienda, 2019). En este sentido, la región del Parque Chaqueño aportó gran parte de la madera total extraída del bosque nativo en el país, mientras que las regiones restantes, tuvieron una participación poco significativa. El 87% de la extracción de

productos madereros de origen nativo se encuentra concentrado entre las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Formosa. En el año 2016 la madera extraída de algarrobo, para todo destino (rollizos, leña, carbón, postes, etc.), ascendió a un total de aproximadamente 160.000 m³ (Ministerio de Hacienda, 2019), similar al reportado por Verga (2005). Esto se suma que los ciclos de reposición en el bosque nativo, posee ciclos de reproducción más largos, dependiendo de la especie y región que se trate, en relación a las plantaciones que son aproximadamente entre 8 y 20 años (para las especies más utilizadas) (Ministerio de Hacienda, 2019).

Ante esta problemática se tomaron inicialmente ciertas medidas drásticas, como la creación de la Ley N° 6.277 (Cámara de Diputados, 1996), donde se prohíbe la explotación de *Prosopis alba*, en todo el territorio de la provincia de Santiago del Estero. Sin embargo, más recientemente se hicieron numerosos esfuerzos por domesticar y conservar la especie, tal es la importancia que se creó el Programa Nacional del algarrobo mediante la Resolución N° 244/2013 (Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, 2013) y mediante la Ley 25.080 (Congreso de la Nación Argentina, 1998) de Inversiones para Bosques Cultivados, se promueven plantaciones forestales, enriquecimiento o emprendimientos silvopastoriles con especies del género *Prosopis* y otros (López, 2005). Estudios sobre las características de madera y los factores que en ella influyen, son de vital importancia, si se pretende instalar en el mercado local, nacional e internacional madera de calidad.

La calidad de la madera puede definirse en base a los atributos que la hacen valiosa para un determinado uso final (Nisgoski, 2005; Mazet y Janin, 1990). Cuando la calidad de la madera está incluida en un programa de mejora forestal, la variable tradicionalmente evaluada es la densidad de la madera (López, 2004), por su facilidad en la determinación, fuerte vinculación con la productividad, calidad de los productos obtenidos y por representar una respuesta de las características anatómicas y químicas de las especies (Nisgoski, 2005). Ponce (1995), menciona que la producción de madera aserrada, es fundamental para la disminución de las concentraciones de CO₂, ya que el gas absorbido de la atmosfera y almacenado en la madera es inmovilizado durante toda su existencia, siendo tanto más efectivo cuanto más duradero es este material. De esta forma, el uso del producto forestal como madera sólida brinda beneficios, económicos y sociales, generando también consecuencias positivas para el medio ambiente.

Otro de los principales criterios de determinación de la calidad es la apariencia superficial, principalmente si el uso final de la madera es la fabricación de muebles, de pisos u obje-

tos decorativos. Estándares específicos de colores y diseños son señalados como tendencias y modismos en la industria del mueble, tornando lo visual del material como un factor limitante en la elección de una especie (Griebeler, 2013). Según Lima *et al.*, (2005), el análisis colorimétrico de un producto final, garantiza un estándar de calidad de mercado, exigido mundialmente.

En este contexto las variaciones en el color, la densidad básica del leño y las características anatómicas tienen influencia y se pueden modificar entre ellos, son de importancia e interés para evaluar la calidad de la madera para usos como material sólido. Autores como Garcia y Marinonio (2016); Sotelo Montes *et al.*, (2013); Igartúa y Monteoliva (2010); Bolzón *et al.*, (2010); Villegas y Área (2009); Vanclay *et al.*, (2008); Sotelo Montes *et al.*, (2008); Bradbury (2007); Nicholas *et al.*, (2007) Thulasidas *et al.*, (2006); Garcia *et al.*, (2014), realizaron valiosos aportes en distintas especies de interés comercial sobre esta temática, encontrando que tanto la densidad de la madera, la colorimetría, y rasgos anatómicos se correlacionan y pueden variar entre sitio, plano de corte, posición de la muestra dentro del árbol, con la edad, tratamientos culturales, entre otros.

En *Prosopis alba* caracteres relacionados a la anatomía del leño, corteza, crecimiento de la especie, principales defectos, colorimetría con la carta de colores Munsell, fueron abordados por distintos autores (Bolzón *et al.*, 2010; Juárez de Galíndez *et al.*, 2007; Giménez *et al.*, 2001; Giménez *et al.*, 2000; Giménez *et al.*, 1998;). Sin embargo, son pocos los estudios donde se analizan estas variables (colorimetría, densidad básica y anatomía) en conjunto, teniendo en cuenta un gradiente ambiental.

En base a este análisis en el marco de proyectos institucionales, entre la Facultad de Ciencias Forestales, UNSE, el INTA y la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba, se hicieron campañas de extracción de algunos árboles semilleros de algarrobo blanco, en la región Chaqueña. Con el fin de generar información base, sobre esta especie, que tenga en cuenta ciertos parámetros de calidad de madera que estén orientados a seleccionar las mejores poblaciones adaptadas a los cambios de las condiciones ambientales y responder a nuevas necesidades humanas, se plantea la siguiente hipótesis.

1.1. Hipótesis

Los parámetros de calidad de madera como color, densidad básica y características anatómicas varían con el sitio y el árbol.

1.2. Objetivo general

Evaluar la variabilidad de la calidad de madera en poblaciones de *Prosopis alba* a través de variables colorimétricas, microscópicas y densidad básica.

1.3. Objetivos específicos

- Determinar la variabilidad entre sitios y dentro del árbol de:
 - color de la madera,
 - densidad básica del leño,
 - características anatómicas de la madera.
- Correlacionar la densidad básica con rasgos dendrométricos, microscópicos y parámetros colorimétricos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Consideraciones generales sobre *Prosopis alba*

El género *Prosopis* se encuentra ampliamente distribuido en distintas regiones del mundo (Fagg y Stewart, 1994) (Figura 1). De las 44 especies de *Prosopis* existentes, 40 especies de *Prosopis* son nativas de América. De este total, 28 se encuentran en ambientes áridos y semiáridos en el la zona centro y norte de Argentina (provincias fitogeográficas del Chaco, Espinal y del Monte) y constituyen el mayor centro de diversidad de la especie (López, 2005).

De todas las especies del género sólo unas pocas son de gran relevancia económica, entre las que se encuentra *Prosopis alba* Griseb (algarrobo blanco) (Cisneros y Moglia, 2017).

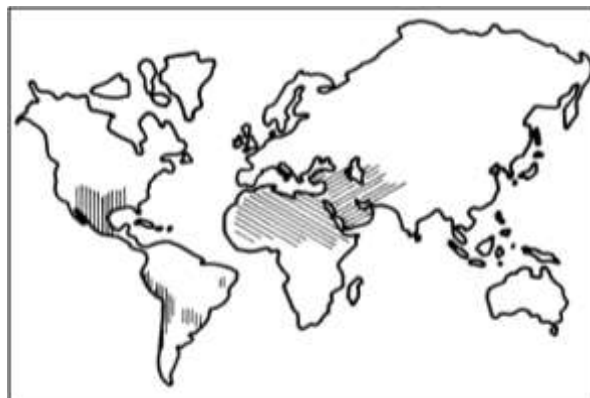


Figura 1 Distribución del género *Prosopis* a nivel mundial.
Fuente: FAO (1988).

El algarrobo blanco se distribuye en aproximadamente 23.000.000 has de bosques nativos de la Región Chaqueña, es dominante en áreas bajas y paleocausas que ocupan aproximadamente un 10% de la superficie en las provincias de Chaco y Formosa, donde se concentra un 80% de extracción de madera de algarrobo (Verga, 2005). Encontrándose próximo a ríos, en los bordes de las represas, o en cinturones boscosos alrededor de depresiones salinas (Giménez *et al.*, 2001). Según Villagra *et al.* (2010) en zonas áridas con precipitaciones (<350 mm), especies de *Prosopis* no pueden crecer independientemente de una capa freática accesibles.

Por su parte, Antezana *et al.* (2000), mencionan que la especie se distribuye en un rango altitudinal muy amplio desde los 260-3000 msnm y un rango de precipitaciones entre los 400-800 mm/año, comportándose como un freatófito facultativo (Jobbágy *et al.*, 2011), estagnófilo facultativo o halófito facultativo. Esta especie de ecología muy amplia puede tolerar suelos arcillosos salobres o salinos con valores de hasta los 300 mmol.L⁻¹ de NaCl no afectando la biomasa de la planta (Meloni *et al.*, 2004).

Los algarrobales de las zonas áridas han sido fuente de subsistencia para numerosas comunidades humanas durante varios siglos y hasta el presente sigue siendo explotado por los habitantes de zonas rurales, sobre todo por las características y usos de su madera y la calidad proteica de sus frutos (Cisneros y Moglia, 2017).

2.2. Características de las poblaciones de *Prosopis* (rodiales)

El Algarrobo es un complejo sistema de especies taxonómicas, entrelazadas entre sí que dan por resultado un sin número de formas que ocupan diversos nichos en más de la mitad del territorio continental argentino, extendiéndose también hacia Paraguay, Bolivia, Chile y Perú. (Verga, 1995).

En Argentina, el género *Prosopis* ha sufrido un proceso adaptativo desde el Chaco subhúmedo hacia zonas más áridas y frías al oeste y al sur. Este proceso ha ocurrido a través de la adquisición de adaptaciones morfológicas y fisiológicas, como el paso de bioformas arbóreas a arbustivas, reducción foliar, ajuste osmótico, entre otros (Villagra, 2000), con el consecuente posible cambio o no de rasgos asociados a la calidad de madera.

Estudios efectuados por Verga *et al.* (2009), probaron la existencia de 3 tipos morfológicos de *Prosopis alba*: “*P. alba* santiagueño”, “*P. alba* Chaqueño Norte y Sur”, los cuales atribuyen las diferencias principalmente a diferencias ambientales (precipitación, tipo de suelo y régimen hídrico del suelo). Por su parte Cony (1996), reportó una alta variabilidad genética, tanto dentro como entre poblaciones, y una alta heredabilidad de esta variabilidad. Estos hallazgos sugieren un conjunto complejo de factores genéticos y ambientales que determinan las diferencias de crecimiento entre las poblaciones y las formas de crecimiento (Villagra *et al.*, 2010).

2.3. *Prosopis alba* en la industria

La excesiva tala de especies autóctonas, pertenecientes al género *Prosopis*, que son de gran interés como proveedoras de materia prima óptima para el consumo humano y animal, limitó drásticamente la capacidad para atender la demanda de productos leñosos y alimenticios (López, 2005). Actualmente todos los programas y leyes que fomentan domesticar y conservar la especie (Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, 2013; Congreso de la Nación Argentina, 1998) promueven mejorar la oferta de materia prima de *Prosopis*, con el fin de atender la demanda de productos leñosos (López, 2005).

Estos lineamientos gubernamentales, proponen un incremento sustantivo de la oferta de madera rolliza, que garanticen la continuidad de la oferta de materia prima para las pequeñas/medianas industrias de la madera. Entre los años 2000-2019, se plantaron alrededor de 542.044 ha en todo el país, con fondos de la Ley 25.080, constituyendo entre las provincias del Chaco, Formosa y Santiago del Estero, solo un 0,72% de la superficie total de estas tres provincias (Secretaría de Agroindustrias, 2019).

Actualmente el algarrobo constituye el principal grupo de especies nativas de Argentina para la producción de madera de aserrío, lo cual se debe a las excelentes propiedades físico-mecánicas de su madera: muy estable, densa y de baja contracción volumétrica (Turc y Cutter, 1984; Araujo *et al.*, 2003; Pometti *et al.*, 2009). En el año 2016, se utilizaron 160.000 m³ de madera de algarrobo (Ministerio de Hacienda 2019). Esto representa casi un 3% del consumo total de madera de especies nativas del país para todo destino (rollizos, leña, carbón, postes, etc.) (Ministerio de Hacienda 2019). Se estima que mas del 60 % de los muebles de algarrobo son elaborados con madera de *Prosopis alba* (Gómez *et al.* 2020)

Por ser el algarrobo blanco de sumo interés en varios ámbitos, son necesarios estudios de calidad de madera con énfasis en su colorimetría, densidad básica, y rasgos anatómicos, con el fin de explicar esas variaciones en la calidad del leño desde este punto de vista. Esto contribuiría en cierta medida a identificar algunos sitios donde la materia prima de esta especie tendría un comportamiento más adecuado para la industria del aserrío. Pometti *et al.* (2009) mencionan que uno de los problemas en la comercialización de la madera de *Prosopis* es la falta de estandarización de sus cualidades. Actualmente la madera de *Prosopis alba* se vende por peso (entre US\$ 56 a US\$ 67 la tonelada, de madera verde y seca respectivamente). Möttönen (2002) señalaron que las características de la madera y la uniformidad del color en la madera desempeñaban un papel importante en el establecimiento de los precios de la madera.

2.4. Principios básicos sobre colorimetría

Por definición colorimetría es la técnica y la ciencia, que busca con el auxilio de modelos matemáticos, describir, cuantificar y simular la percepción del color por el hombre. Es la interacción de la luz con los materiales que, como sensación, se percibe por los ojos e interpreta el cerebro (López, 2009).

El ojo humano es sensible a la longitud de onda de 400-700 nm (Hon and Shiraishi, 2001). Cuando la luz visible golpea un objeto, puede reflejarse, transmitirse o absorberse (Figura 2). Dependiendo del material, ciertas longitudes de onda pueden ser absorbidas, otras pueden reflejarse, así es como se crea la impresión de color básica. Basado en la suma de las longitudes de onda reflejadas, el ojo humano percibe un cierto color del material. Con todas sus sustancias contenidas, la madera absorbe y refleja la luz visible de una manera característica. Los colores de madera aparecen en un rango que va desde casi blanco (por ejemplo, *Populus alba*), varios tonos amarillentos, rojizos y pardos hasta casi negros (por ejemplo, *Diospyros ebenum* J.Koenig ex Retz.) (Meints *et al.*, 2017).

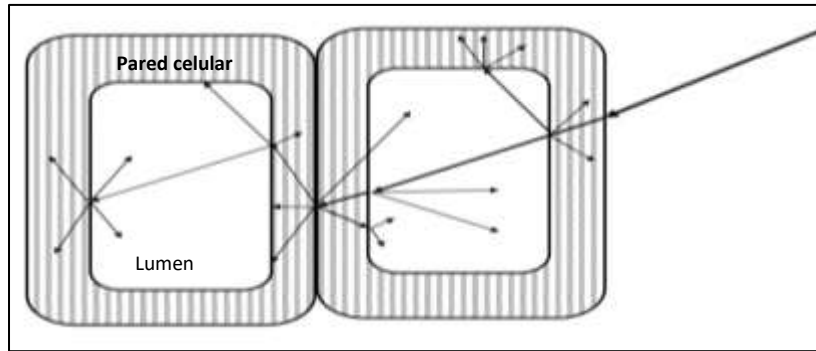


Figura 2 Recorrido de un rayo de luz a través de células de madera llenas de aire.

Fuente: Modificado de Meints *et al.* (2017)

El análisis de color se utiliza con mucha frecuencia en diferentes sistemas de producción fabril, por ejemplo: industrias textiles, automotrices, químicas, plásticas entre otras (Griebeler, 2013; Meints *et al.*, 2017). En la industria maderera, la medición de los colores sigue siendo una técnica poco conocida y utilizada, que comienza a ser introducida para agregar valor a los productos. Uno de los sistemas más utilizados para la medición de color es el Sistema CIELab 1976 (Comission Internationale de l'Eclairage) (Figura 3), se basa en tres elementos: la luminosidad o claridad, la tonalidad o el matiz y la saturación o cromaticidad (Camargos y Gonçalves, 2001), originados a través de los parámetros colorimétricos: luminosidad (L^*), coordenada del eje rojo-verde (a^*), coordenada del eje azul-amarillo (b^*), saturación (C) y ángulo de tinta (h^*), estas dos últimas calculadas a partir de a^* y b^* (Camargos y Gonçalves, 2001; Liu *et al.*, 2005).

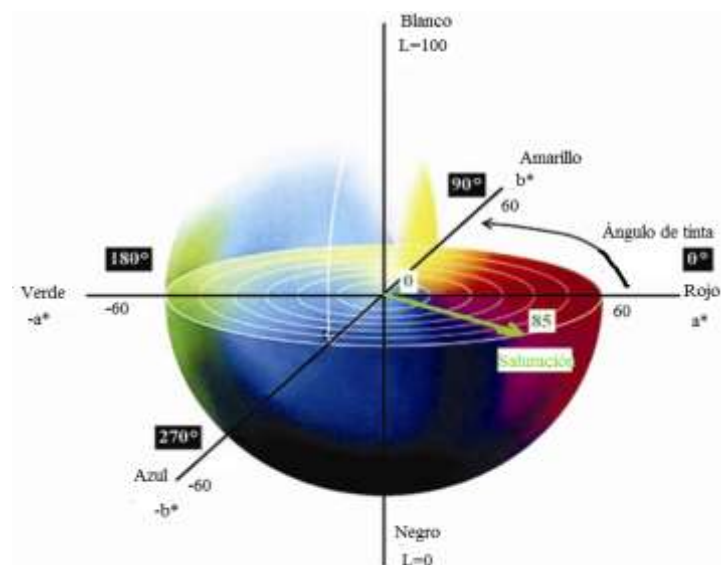


Figura 3 Representación del sistema colorimétrico CIELab 1976.

Fuente: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0044848604004867-gr1.sml>

En la figura 3, el eje vertical muestra el brillo o claridad, que define la escala de grises entre blanco y negro. Se expresa por los parámetros colorimétricos L^* y tiene un valor de 0 (cero) para el negro absoluto y 100 para el blanco total. El matiz, se expresa por los colores rojo, verde, amarillo y azul que se representan en forma de un círculo cortado por dos líneas perpendiculares que pasan por el centro, se encuentran en el rango de 0 a 60 y sin unidad de medida. El pigmento o matiz rojo, verde, amarillo y azul se define por las coordenadas $+a^*$, $-a^*$, $+b^*$ y $-b^*$, respectivamente, y por lo tanto, cualquier variación de estas coordenadas significa que el color puede enrojecer ($+a^*$) enverdecer ($-a^*$), amarillar ($+b^*$) o azular ($-b^*$) (Camargos y Gonçalves, 2001; Griebeler, 2013).

2.4.1. Importancia del color de la madera

La colorimetría describe cada elemento de la composición de un color, numéricamente, por medio de aparatos apropiados (Atayde *et al.*, 2011).

Existen numerosos estudios con madera de *Prosopis alba* que concluyen que es apta para usos sólidos, pero las evaluaciones basadas en el color con sistema CIELab, no existen actualmente en esta especie, por requerir equipamientos más especializados y de mayores costos. El color es una de las características más importantes para la identificación e indicación de usos de especies de madera, principalmente cuando está asociada a los aspectos de textura y diseño (Camargos y Gonçalves, 2001).

La homogeneidad del color de la madera, en un lote a ser utilizado industrialmente es un requisito básico de calidad, ya que reflejará la homogeneidad de los productos resultantes de su beneficio (Atayde *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2015). La amplia variación de color de la madera entre y dentro del árbol se considera un problema, en algunos casos, particularmente en mercados donde la consistencia es importante (Nicholas *et al.*, 2007). La reducción de la variabilidad en el color dentro de la madera es a menudo una prioridad para las especies comercialmente importantes utilizadas para muebles (Sotelo Montes *et al.*, 2013). Con ello, se hace clara la necesidad de determinar el color de la madera y su variabilidad, como instrumento de toma de decisión sobre su utilización como materia prima, dentro de un segmento industrial, que debe centrarse el valor estético de sus productos (Abrahão, 2005).

El empleo de la colorimetría cuantitativa, considera en forma indirecta rasgos superficiales en la madera como la textura, el grano, veteado, determina de manera exacta el color de la madera y representa una de las mejores metodologías para el estudio y la determinación de la calidad, desde el punto colorimétrico (Gonçalez *et al.*, 2001; Camargos y Gonçalez, 2001). Actualmente para investigaciones científicas y control de calidad industrial, son necesarias técnicas más refinadas de determinación del color. En este contexto, la colorimetría cuantitativa es una de las metodologías más eficientes y precisas para la determinación del color (Gonçalez *et al.*, 2001; Autran y Gonçalez, 2006).

2.4.2. Estudios sobre colorimetría de madera

Son numerosos los factores que pueden influir en el color de la madera como composición química (Baar *et al.*, 2014; Moya *et al.*, 2012), el contenido de humedad, la anatomía del leño (Möttönen, 2005; Macedo, 2002), inclinación del árbol, plano de corte (Barros *et al.*, 2014; Atayde *et al.*, 2011), el sitio (Villegas, 2009; Moya y Berrocal, 2010; Santos, 2018), la altura y la edad de los individuos, así como tratamientos silvícolas (Nicholas *et al.*, 2007), el tipo de suelo y condiciones ambientales donde se desarrolló la planta (Boudouaya *et al.*, 2017; Orellana, 2015; Moya y Calvo-Alvarado, 2012) y además de los factores genéticos inherentes a cada especie (Moya y Marín, 2011; Sotelo Montes *et al.*, 2008; Gonçalez, 1993). Por ejemplo, Rink (1987) encontró una baja heredabilidad para el color del duramen en nogal negro, lo que sugiere que los factores ambientales y/o factores de manejo desempeñan un papel importante en la determinación de este importante parámetro de calidad de la madera.

Los estudios sobre colorimetría en maderas a nivel mundial, se realizaron en grandes grupos de especies como los efectuados por Nishino *et al.* (1998), en 97 especies en Guayana Francesa, Camargos y Gonçalez (2001) en 350 especies de madera en Brasil respectivamente, donde encontraron que a partir de los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , y h^*) es posible agrupar colorimétricamente las distintas especies y encontrar de esta forma sus posibles usos. Estudios más recientes, se centraron en especies puntuales de gran interés comercial tales como: *Tectona grandis* L., *Acacia melanoxylon* R.Br., *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. f. ex K. Schum., *Eucalyptus dunni* Maiden, *Corymbia* sp, *Pinus* sp, entre otras (Thulasidas *et al.*, 2006; Nicholas *et al.*, 2007; Vanclay *et al.*, 2008; Lourenço *et al.*, 2008; Bradbury *et al.*, 2010; Amorim *et al.*, 2013; Garcia *et al.*, 2014; López, 2014; Arce y Moya, 2015; Silva *et al.*, 2017).

En Argentina, existen pocos estudios en colorimetría de madera tales como los realizados por Villegas (2009) en clones de *Salix* plantados en distintos sitios, quien encontró que los parámetros L*, b* y blancura, resultaron significativos estadísticamente en la interacción de *sitio x clon*. López (2014) por su parte, evaluó la variabilidad del color de la albura y duramen en 314 árboles de *Eucalyptus dunni* a los 20 años de edad, encontrando grandes variaciones individuales del color entre la albura y el duramen. Por su parte, Monteliva *et al.* (2009) en *Acacia melanoxylon*, también evaluaron el color dentro de los individuos y entre sitios encontrando diferencias significativas en los parámetros colorimétricos en ambas fuentes de variación.

En *Prosopis alba*, Cisneros *et al.* (2013) evaluaron macroscópicamente con la carta de colores Munsell el color de la madera de esta especie, encontrando variaciones entre sitios y dentro de cada sitio, se observó también variabilidad en el color dentro de los individuos, siendo la albura blanco crema/amarillento a amarillo intenso, mientras que el duramen fue descrito entre castaño rosáceo/grisáceo a castaño oscuro/rojizo, inicialmente esto también fue repotado por Giménez *et al.* (2000), Giménez *et al.* (1998) En *Prosopis alba*, aún no se tiene conocimiento sobre estudios que se hayan realizado sobre colorimetría en madera con el sistema CIELab 1976, en base a esto se considera de gran importancia su determinación.

2.5. Densidad básica en el leño

La densidad básica de la madera (DBm de aquí en adelante) es un rasgo funcional que se expresa como el peso seco de una sección leñosa de una planta (tallo, raíz, ramas, etc.), dividido por el volumen de la misma sección cuando se encuentra saturado de agua y es expresado normalmente en g/cm^3 o en kg/m^3 (IRAM 9544, 1973).

Uno de los rasgos clave que parece vincular muchos rasgos funcionales de la planta es la densidad del tejido (Swenson y Enquist, 2007). Según Chave *et al.* (2009) la densidad de la madera refleja la inversión de carbono de una planta en sus tejidos en relación con el tamaño del tallo y, como tal, es un rasgo clave correlacionado con muchos aspectos de la ecología de una planta por ejemplo, tasa de crecimiento (Díaz *et al.*, 2010), supervivencia (Martínez Meier *et al.*, 2008). Martínez-Cabrera *et al.* (2009) afirman que el xilema denso requiere una mayor inversión de carbono, para un incremento dado en el diámetro del tallo, que el xilema liviano.

El estudio de variabilidad en la densidad de la madera, contribuyen a lograr mejores estimaciones del contenido de carbono, cuantificar muchas veces los servicios ecosistémicos del bosque (mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero) pero al mismo tiempo también refleja la asignación diferencial de la producción metabólica (por ejemplo, defensa, mantenimiento, reproducción), así como biomecánica (Jacobsen *et al.* 2006) y de funcionamiento hidráulico (Hacke y Sperry, 2001; Hacke *et al.*, 2001; Sperry *et al.*, 2008).

La densidad de la madera es una propiedad universalmente utilizada como índice de calidad en relación a sus usos, por estar correlacionada con la mayoría de las propiedades físico-mecánicas del tallo y por ende, es un factor determinante de su aptitud para la industrialización (Zanne *et al.*, 2010; Chave *et al.*, 2009; Jacobsen *et al.*, 2007). Esta propiedad, puede variar ampliamente dentro de un árbol, desde la médula hacia el exterior (en las diferentes edades) (Winck *et al.*, 2014; Winck, 2013; Díaz *et al.*, 2010; Igartúa *et al.*, 2009; McDonald y Hubert, 2002; McDonald *et al.*, 1995) o axialmente desde la base del tronco hacia el ápice (Igartúa *et al.*, 2015). Incluso dentro de los anillos de crecimiento (Martínez Meier *et al.*, 2008; Alarcón *et al.*, 2016). Mientras que otros autores han sugerido que la densidad de la madera también puede variar con factores ambientales como la temperatura (Thomas *et al.*, 2004; Swenson y Enquist, 2007; Martínez-Cabrera *et al.*, 2009), la precipitación (Martínez Meier *et al.*, 2008; Martínez-Cabrera *et al.*, 2009; Alarcón

et al., 2016) y en gradientes ambientales (Chave *et al.*, 2006); aunque en algunos estudios no se encontraron correlaciones significativas (Corcuera *et al.*, 2011).

Chave *et al.* (2006) realizó un extenso estudio sobre la variación filogenética y regional de la densidad de la madera en 2456 especies encontrando que el ambiente, más precisamente la altitud afecta a la densidad de la madera, siendo menor este rasgo a mayor altitud, este estudio fue ampliado posteriormente por Swenson y Enquist (2007).

Más recientemente Martínez Meier *et al.* (2008) encontraron que los árboles sobrevivientes de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) a la ola calor y sequía del año 2003, en Europa, tenían una densidad media de anillos significativamente mayor, una mayor densidad en la madera tardía y una proporción de madera tardía significativamente más altas respecto a los individuos muertos. Ellos consideraron que un aumento de los componentes de la densidad de la madera tardía en los árboles sobrevivientes, podría estar relacionado con la plasticidad del xilema y esto podría estar relacionado con una resistencia a la sequía, comportamientos similares también fueron evaluados y reportados por Phillips *et al.* (2010) y Condit *et al.* (1995). Sotelo Montes y Weber (2009), evaluaron la densidad de *Prosopis africana* quienes encontraron variaciones significativas entre procedencias de sitios húmedos y secos y familias dentro de las procedencias.

Tradicionalmente la madera de *Prosopis alba* fue caracterizada y estudiada desde el punto de vista tecnológico basado en sus propiedades físicas, mecánicas y anatómicas (Turc and Cutter, 1984; Giménez *et al.*, 2000; Giménez *et al.*, 2001; Giménez *et al.*, 1998; Pometti *et al.*, 2009). Moglia *et al.* (2016), por su parte, en el marco de proyectos de investigación aplicada, evaluaron la calidad de madera de rodales semilleros, encontrando que la especie presenta un valor promedio de anisotropía de 1,69 con muy bajos valores de variabilidad entre sitios y árboles. La contracción total de la madera de *Prosopis alba* para todos los sitios fue considerada como muy pequeña para ambas posiciones (radial = 1,63 a 1,73% y tangencial de 2,99 a 3,35%). Los rangos de valores de contracción volumétrica de los sitios variaron entre 5,15 a 5,41%. Estos valores indican que la especie tiene un rango normal de contracciones y anisotropía, siendo su madera apta para usos sólidos.

La densidad de la madera en *P. alba* fue estudiada por numerosos autores tanto en bosques nativos (Moglia *et al.*, 2016; Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2003; Araujo *et al.*, 2003; Galera, 2000; Tortorelli, 2009), como en plantaciones (Moglia *et al.*, 2016; Pometti *et al.*, 2009), encontrado densidades variables para esta especie entre 0,61-0,85

g/cm³. Moglia *et al.* (2016) evaluaron la densidad básica en esta especie, tanto en rodales nativos como plantación, encontrando que el sitio no tiene efecto significativo sobre la densidad, por lo que no mostró ser un índice eficiente para valorar la calidad de la madera por sitios, debido a la alta variabilidad entre árboles. Sin embargo, es necesario hacer énfasis en el comportamiento de la densidad de la madera teniendo en cuenta un gradiente ambiental.

Actualmente existen estudios en otras especies sobre el comportamiento de la densidad en ambientes distintos, tales como los efectuados por Moglia y López (2001) en *Aspidosperma quebracho blanco*. Nicholas *et al.* (2007) quienes determinaron que la densidad de la madera es influenciada por el sitio y los tratamientos silviculturales en *Acacia melanoxylon*. Igartúa y Monteoliva (2010) quienes también evaluaron la variación de la densidad básica en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* encontrando diferencias significativas entre las procedencias.

2.6. Aspectos Anatómicos en la madera de *Prosopis alba*

Los tejidos leñosos de los árboles y otras plantas realizan tres funciones importantes. Proporcionan apoyo biomecánico para los tejidos fotosintéticos sobre el suelo (Zheng y Martínez-Cabrera, 2013) conducen agua y nutrientes a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera (Sperry *et al.*, 2008) y actúan como almacén de nutrientes como carbohidratos, compuestos químicos secundarios defensivos, lípidos y agua (Monteoliva *et al.*, 2017, Zanne *et al.*, 2010, Moglia y Giménez, 1998). Como la madera realiza más de una tarea, existen demandas conflictivas sobre la estructura de la madera y estas demandas pueden variar dependiendo del ambiente (Chave *et al.*, 2009; Moglia y López, 2001). A lo largo de la evolución, han surgido nuevos tipos de células, y la variación en el tamaño, la forma, la disposición y la frecuencia de estos tipos de células ha dado lugar a una diversidad de maderas que realizan estas funciones en un rango de entornos ecológicos (Montaño-Arias *et al.*, 2013; Choat *et al.*, 2012; Chave *et al.*, 2009; Tsuchiya y Furukawa, 2009; Sperry *et al.*, 2008; León, 2005; Lindorf, 1994).

Estas estrategias ecológicas que le permiten a las plantas vivir a lo largo de gradientes ecológico o en distintos ambientes, muchos autores la relacionaron con aspectos anatómicos y a las distintas estrategias adaptativas de las plantas (Robert *et al.*, 2009; León, 2005; Villagra y Roig, 1997 Lindorf, 1994; Carlquist y Hoekman, 1985). Por ejemplo León

et al. (2005) estudió la Anatomía ecológica del xilema secundario de un bosque seco tropical de Venezuela, encontrando tendencias con predominio de caracteres que se orientan hacia la eficiencia de la conducción de agua designándose como leños mesomórficos.

En la Región chaqueña Moglia y Giménez (1998), Moglia y López (2001), Giménez y López (2002), Giménez y Moglia (2003), Tortorelli (2009), Giménez (2000), realizaron valiosos aportes sobre la anatomía del leño de numerosas especies de interés comercial de esta región. Por ejemplo, Moglia y Giménez (1998) realizaron estudios de las estrategias adaptativas del hidrosistema del xilema de algunas especies que crecen en la Región Chaqueña (Argentina), encontrando que algunas especies sobre todo las pertenecientes a la región más seca del Parque Chaqueño se destacan por la cantidad de características xeromórfica por ejemplo: vasos pequeños, numerosos y agrupados, presencia de traqueidas vasicéntricas. Recientemente, este estudio fue ampliado con un mayor número de especies (Giménez y Moglia, 2017), encontrando que existe una tendencia clara entre el diámetro de vasos y su frecuencia/mm² en los distintos distritos del Chaco (Chaco húmedo, Chaco de transición y Chaco seco).

En *Prosopis alba* Giménez *et al.* (2000), Bolzón *et al.* (2010), Tortorelli (2009) hicieron hincapié en aspectos anatómicos en esta especie, encontrado que los vasos constituyen cerca de un 12% del volumen de la madera siendo por lo general obstruidos por gomas, tílides, entre otros; el parénquima representa un 45% aproximadamente del volumen de madera, mientras que los radios y las fibras constituyen entre el 13 y 30% del volumen de la madera respectivamente.

Considerando las proyecciones para el clima en el futuro en la región, los cuales apuntan a cambios significativos en la disponibilidad de agua y aumentos de temperatura (Martínez Meier *et al.*, 2008), se considera importante, obtener genotipos mejores adaptados frente al cambio climático, asociados con rasgos del xilema que confieran mayor tolerancia de las especies al estrés ambiental (Jacobsen *et al.*, 2007). Esto fue evaluado en distintas especies de gimnospermas (Martínez Meier *et al.*, 2008; Hacke y Sperry, 2001) y angiospermas (Villagra y Roig, 1997; Jacobsen *et al.*, 2007; Hacke y Sperry, 2001). En *Prosopis alba*, existen pocos estudios relacionados a este tema. Es por ello, que en esta tesis teniendo en cuenta un gradiente ambiental, se pretende dar respuesta a: ¿Qué rasgos anatómicos varían y en qué proporciones en los distintos ambientes?

2.7. Correlación entre densidad básica, color, y anatomía del leño

La densidad de la madera es esencialmente una propiedad emergente, determinada por los atributos y tipos de células en el xilema (Martínez Cabrera *et al.*, 2009). Resulta de las dimensiones celulares, de la composición química y de las proporciones relativas de los tejidos constitutivos (Díaz *et al.*, 2010), es por ellos que numerosos estudios han hecho énfasis en los principales rasgos anatómicos que pueden afectar a la densidad de la madera, tales como los antecedentes reportados por Poorter *et al.* (2010), Preston *et al.* (2006), Jacobsen *et al.* (2007), Zheng y Martínez-Cabrera (2013), Ziemska *et al.* (2013), Xavier (2008), quienes encontraron correlaciones significativas entre la densidad de la madera con la fracción del lumen o área de vasos. Sin embargo otros autores han demostrado una falta de asociación entre estas variables (Martínez-Cabrera *et al.*, 2009; Zanne *et al.*, 2010).

Hacke *et al.* (2001), Hacke y Sperry (2001) basados en un conjunto de datos de 36 especies de arbustos y árboles de angiospermas, encontraron que la resistencia a la formación de embolias se correlacionaba con el aumento de la densidad de la madera, que a su vez se asoció con el aumento de las relaciones entre el espesor de la pared del vaso y la disminución de los diámetros de los vasos. Esto también fue ratificado por Pratt *et al.* (2007) y Jacobsen *et al.* (2007) en distintas especies de angiospermas, así mismo un aumento del MOR también se correlacionó con una mayor resistencia a la cavitación.

Estudios efectuados por Monteoliva *et al.* (2017), Zheng y Martínez-Cabrera (2013), Jacobsen *et al.* (2007), Fujiwara *et al.* (1991), establecieron correlaciones significativas entre la densidad del leño y el contenido de parénquima axial y radial de la madera. El parénquima de las plantas siempre estuvo relacionado a la capacidad de almacenamiento de agua y/o sustancias de reserva (Zheng y Martínez-Cabrera, 2013; Tyree y Zimmermann, 2002; Zimmermann, 1983). Por ejemplo, Pratt *et al.* (2007) determinó que la mayor capacidad del xilema del tallo para almacenar agua está fuertemente vinculada con la reducción del soporte mecánico y la seguridad del transporte. Por otro lado Burgert y Eckstein (2001), determinaron una alta resistencia a la tracción del parénquima radial de aproximadamente 75 MPa, en condiciones secas, lo cual contribuye a la biomecánica de los árboles vivos.

En cuanto a los rasgos de fibra y la densidad de la madera, estudios realizados por Ziemska *et al.* (2013) en 24 angiospermas australianas encontraron correlaciones positivas y significativas entre la densidad de la madera y la pared de fibras, aumentos en el

espesor de la pared de fibras (es decir, disminuciones en los lúmenes de las fibras) van acompañados de un aumento en la densidad del leño, esto también fue reportado por Martínez Cabrera *et al.* (2009). Sin embargo, en estudios efectuados por Jacobsen *et al.* (2007), Zheng y Martínez-Cabrera (2013) algunos rasgos de fibra no se correlacionaron con la densidad del leño.

Por otro lado, el color de las superficies de madera se usa a menudo como un indicador de otras propiedades (Meints *et al.*, 2017). Se establecieron correlaciones significativas entre algunos parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) y la densidad básica de la madera para especies de *Tectona grandis* (García y Marinonio, 2016; Arce y Moya, 2015) *Eucalyptus* y *Corymbia* (García *et al.*, 2014; Amorim *et al.*, 2013; Vanclay *et al.* 2008), *Calycophyllum spruceanum* (Sotelo Montes *et al.*, 2008) y *Pinus* (Amorim *et al.*, 2013). Por ejemplo estudios realizados por Nishino *et al.* (2000), en la albura de 26 especies de madera dura, encontraron relaciones positivas entre la densidad de la madera y los parámetros colorimétricos (a^* , b^* y C), mientras que la luminosidad (L^*) y el ángulo de tinta (h^*) tendió a disminuir con el aumento de la densidad, por lo que maderas de mayor densidad tienden a ser más oscuras. Esto también fue reportado por Sotelo Montes *et al.* (2013) en algunas especies de la región de Mali.

Son escasos los estudios que relacionan el color de la madera con rasgos anatómicos; porque siempre se asoció los parámetros colorimétricos con la cantidad de contenidos presente en las células (Gierlinger *et al.*, 2004; Moya *et al.*, 2012; Romagnoli *et al.*, 2013; Baar *et al.*, 2014), procesos de secado artificial (Griebeler, 2013), o bien en procesos de intensificación del color (Meints *et al.*, 2017). Algunos autores sostienen que cambios en la proporción de los tejidos (Hiller *et al.*, 1972; Macedo, 2002) o el contenido de sustancias presente en las células del xilema (Möttönen, 2005; Baar *et al.*, 2014; Moya *et al.*, 2012) pueden cambiar el color de la madera. Sin embargo, en esta tesis solo se realizaron correlaciones simples entre los parámetros colorimétricos y los distintos tejidos xilémicos, no se midieron contenidos celulares como taninos, resinas y gomas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

Los sitios objeto de estudio se encuentran dentro de una extensa región, El Gran Chaco, donde se encuentra la masa boscosa más grande de Sudamérica, después del Amazonas, y ocupa alrededor de 500.000 km² (Hueck, 1966), encerrando una gran diversidad tanto ambiental como cultural, está constituido por cuatro países Paraguay (25,43%), Bolivia (11,61%), Brasil (0,77%) y Argentina (62,19%) (Figura 4a) (TNC *et al.* 2005).

En Argentina existen grandes ecosistemas (Karlin y Brointein, 1968), entre los que se encuentran la Región Chaqueña (Figura 4b), ubicada en el Centro-Norte del país con una superficie aproximada de 23.000.000 ha (Karlin y Brointein, 1986; Verga, 2005), el relieve es llano con áreas bajas y paleocuases, las precipitaciones en la región semiárida disminuyen hacia el Oeste (750 a 500 mm), aumentando luego por la influencia de la montaña a más de 1000 mm (Figura 4c). Las precipitaciones son estivales y el mayor déficit hídrico ocurre en invierno y se acentúa hacia el Oeste. Los vientos dominantes soplan del sector norte, en verano, y del sur en la temporada invernal.

El área se caracteriza por bosques abiertos xerofíticos y mayormente de hojas pequeñas, donde las comunidades arbóreas más importantes desde el punto de vista ecológico y económico son los bosques de quebracho colorado y quebracho blanco (Giménez *et al.*, 2007). Además de estas dos comunidades Hueck (1966) añade las comunidades de los algarrobos entre ellos *Prosopis alba* (algarrobo blanco) (Giménez *et al.*, 2001; Giménez *et al.*, 1998).

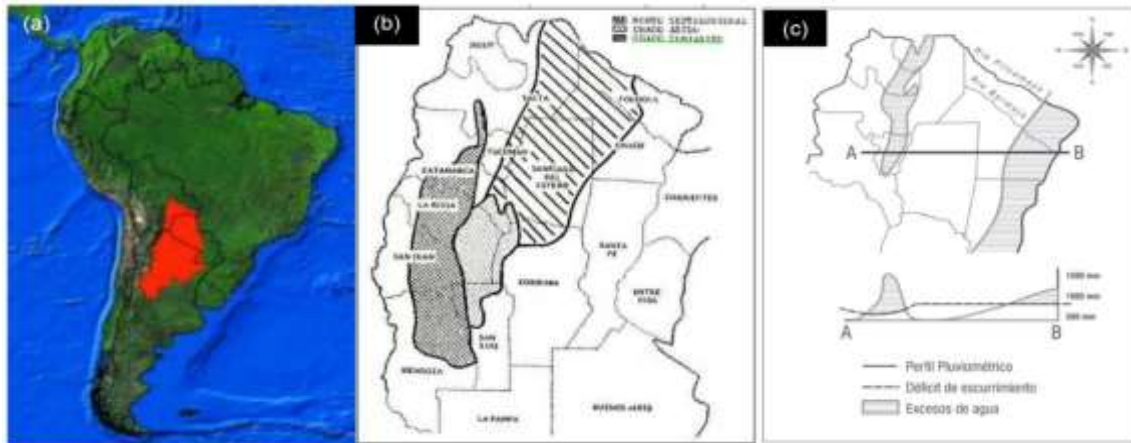


Figura 4 (a) Ubicación del Chaco Americano en Sudamérica. Fuente: TNC *et al.* (2005). (b) Ecosistemas áridos y semiáridos subtropicales Argentinos. Fuente: Karlin y Brointein (1968). (c) Áreas con exceso de agua. Fuente: Bruniard (1978)

3.1.1. Caracterización de los sitios de estudio

El muestreo de árboles se realizó, en la Región chaqueña Argentina, en 4 poblaciones de *Prosopis alba*: 3 rodales naturales, correspondientes a Villa Ángela (Chaco), Los Arias (Santiago del Estero), e Isla Cuba (Formosa) y una plantación en la localidad de San Isidro (Santiago del Estero), teniendo en cuenta un gradiente ambiental con un sitio más húmedo y otros sitios más secos (Figura 5).

3.1.1.1. *San Isidro Plantación*

La plantación posee una superficie de 0,56 ha, la cual se encuentra dentro del área de riego del Río Dulce, localidad de Santa María, Departamento Capital, Provincia de Santiago del Estero ($27^{\circ}58'1.52''S$ y $64^{\circ}12'59.30''O$), región del Chaco Seco. Se trata de una plantación, con fines de restauración, data del año 1992, con un distanciamiento entre plantas de 5 metros y entre filas de 8 metros. Se la instaló de manera consociada con alfalfa (*Medicago sativa*) (Rossi, 2014). La primera poda fue a los 5 años y se realizaron riegos durante la primera etapa de plantación.

El sitio tiene clima semiárido con estacionalidad marcada, veranos calurosos y lluviosos e inviernos fríos y secos, con un déficit hídrico elevado, durante todo el año. La precipita-

ción media anual es en promedio 508 mm, las cuales se concentran en la época estival. La temperatura media anual ronda en los 21,02°C con una evapotranspiración potencial anual de 1077 mm (visor GeoINTA, 2018).

El suelo principal de este sitio pertenece al orden de los Molisoles, al subgrupo de Aplus-tol arídico cálcico, con textura franco arenosa tanto en la superficie como en el horizonte B; el drenaje es algo excesivo, están ubicados en explanada. Una de las principales limitantes es la climática, seguido de la baja retención de humedad (Bianchi y Cravero 2015).

3.1.1.2. Villa Ángela, Chaco

Se encuentra al Sur de la provincia del Chaco (27°39'36.94"S y 60°42'49.28"O) perteneciente a la región Chaco Húmedo, caracterizado por tener un clima subtropical, seco en invierno y tropical muy lluvioso en verano. La precipitación media anual oscila en los 1088 mm, con una temperatura media anual de 20,8°C y una evapotranspiración potencial anual 1055 mm (visor GeoINTA 2018).

La vegetación se caracteriza por poseer palmares de caranday (*Copernicia alba*). En monte bajo degradado, el caranday crece asociado con cina cina (*Parkinsonia aculeata*), algarrobo blanco (*Prosopis alba*) y curupí (*Sapium haematospermum*), entre otras especies.

El suelo principal de este sitio pertenece al orden de los Alfisoles, al subgrupo de Natracualfes albico, con textura franco limosa en la superficie y franco arcillosa en el horizonte B, el drenaje es imperfecto, la posición del suelo es albardón. Una de las principales limitantes es la alcalinidad en los primeros 50 cm de profundidad, seguidos de la susceptibilidad a las inundaciones o anegamientos (Bianchi y Cravero, 2015).

3.1.1.3. Isla Cuba, Formosa

Isla Cuba, se ubica al Noroeste de la provincia de Formosa. El sitio de muestreo se localiza a los 24°17'52.7" S y 61°51'27.4" O. Perteneciente a la región del Chaco Seco, caracterizada por una mayor amplitud térmica (Verga *et al.*, 2009), con una precipitación media anual de 637 mm y temperatura promedio de 22,6°C, la evapotranspiración potencial anual asciende a 1221 mm (visor GeoINTA 2018).

Las especies acompañantes de *Prosopis alba* en este sitio son: timbó blanco (*Cathornium polyanthum*), palo santo (*Bulnesia sarmientoi*), quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*), quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*), mora (*Maclura tinctoria*), guaraniná (*Sideroxylon obtusifolium*), palo borracho (*Ceiba chodatii*), entre otras especies. En el estrato secundario se encuentran sacha naranjo (*Capparis speciosa*), sacha membrillo (*Capparis tweediana* Eichler), chañar (*Geoffroea decorticans* Gill. ex Hook. & Arn.), palo cruz (*Tabebuia nodosa* Griseb), tusca (*Acacia aroma*; Hook. & Arn), mistol (*Sarcomphalus mistol* Griseb), entre otras.

El suelo principal de este sitio pertenece al orden de los Alfisoles, al subgrupo de Natracualfes albico, con textura franco limosa en la superficie y franco-arcillo-limosa en el horizonte B, el drenaje es pobre, está ubicado en zona baja. Una de las principales limitantes es la susceptibilidad a las inundaciones o anegamientos y la erosión hídrica (Bianchi y Cravero, 2015).

3.1.1.4. Los Arias, Santiago del Estero

Los Arias, (27°52'54.93"S y 64° 9'23.87"O) se encuentra en la región del Chaco Seco. La precipitación media anual ronda en los 516 mm, y las lluvias son estivales (PIARFON, 2005). El mayor déficit hídrico ocurre en invierno y se acentúa hacia el Oeste. La temperatura media anual es de 21,03°C con una evapotranspiración potencial anual de 1077 mm (visor GeoINTA 2018).

La vegetación en el estrato arbóreo predominan *Schinopsis lorentzii* y *Aspidosperma quebracho blanco*. En el sitio de estudio se encuentra una comunidad seral cuyo principal componente es el algarrobo blanco acompañado de *Celtis tala* (tala), *Schinus* sp, *Vallesia glabra* (ancoche) y *Solanum* sp., entre otros.

El suelo principal de Los Arias, pertenece al orden de los Alfisoles, al subgrupo de los Natracualfes típico, con textura franco arenosa en la superficie y arcillosa en el horizonte B, el drenaje es pobre y con poca alcalinidad, los mismos están ubicados en el plano aluvial del Río Dulce. La principal limitante es el drenaje deficiente, seguido de la salinidad en los primeros 50 cm de profundidad.

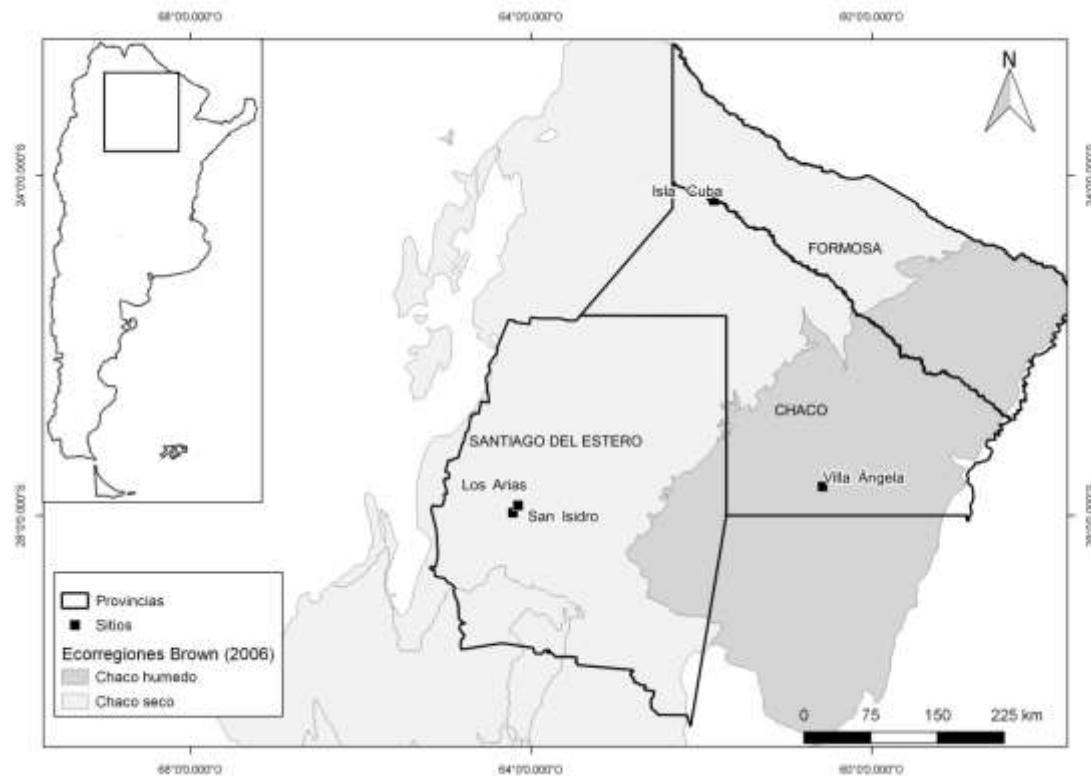


Figura 5 Sitios de muestreo. *Fuente:* Autor (2020)

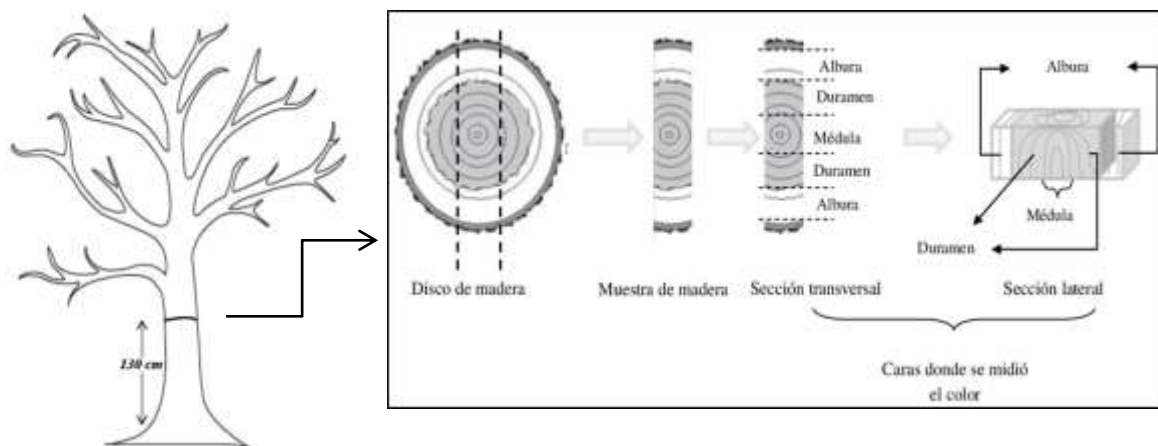
3.2. Obtención de muestras de madera

En cada uno de los sitios se apearon 6 árboles adultos, sanos, sin signos de enfermedad visible, con copas dominantes o co-dominantes, según recomendaciones de Moglia y Giménez (1998). En cada ejemplar se marcó la orientación norte a lo largo del fuste, se midieron las siguientes características dendrométricas: diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, de fuste y 4 radios de copa (Norte, Sur, Este, Oeste) (Tabla 1). Luego del apeo, se extrajeron rodajas a 1,30 m de 5 cm de espesor (Giménez *et al.*, 2001), sobre las que se obtuvieron 2 tipos de muestras: probetas para la determinación de la densidad básica, para preparados microscópicos y listones para determinación del color (Figura 6 y 7).

Tabla 1. Rasgos dendrométricos en individuos muestreados de *Prosopis alba* por sitio

Sitio	Variable	n	Media	CV	Mín	Máx
Isla Cuba	Ht	6	10,7	8,11	9,85	12,06
	Hf	6	2,43	25,92	1,95	3,65
	DAP	6	32,3	8,67	29,8	36,2
	Vc	6	700,93	23,59	461,27	913,4
Los Arias	Ht	5	8,71	9,72	7,8	9,75
	Hf	4	3,49	24,7	2,4	4,37
	DAP	5	27,75	23,37	20,05	35,33
	Vc	5	364,35	45,29	208,79	640,38
San Isidro	Ht	6	8,54	8,47	7,55	9,6
	Hf	6	1,59	23,61	1	2,05
	DAP	6	27,52	22,84	17,3	34,6
	Vc	6	331,63	37,71	195,91	567,84
Villa Ángela	Ht	6	10,17	21,02	6,5	12,5
	Hf	6	3,37	25,32	1,7	4
	DAP	6	39,27	22,52	30,6	55,39
	Vc	6	538,21	57,55	340,81	1155,69

n= árboles muestreados; Min= Mínimo; Max= Máximo, Ht= altura total, Hf= altura de fuste, DAP= Diámetro a la altura del pecho, VC= volumen de copa (m³).

**Figura 6** Esquema de obtención de muestras para densidad básica. Fuente: Autor (2020)**Figura 7** Probetas de madera para medición del color. Fuente: Autor (2020)

3.3. Determinación de la densidad básica

La densidad básica (peso anhidro / volumen verde), se determinó de acuerdo a la norma IRAM 9544, con probetas de 2x2 cm de arista, con distancias variables a la médula, extraídas sobre el radio norte de cada rodaja de madera (Figura 8).



Figura 8 Probetas empleadas para densidad básica.

Fuente: Autor (2020)

Las probetas obtenidas fueron llevadas a estufa a una temperatura de 100°C, hasta alcanzar peso constante (Figura 9). Una vez logrado esto, se colocaron las muestras en agua durante 7 días, hasta alcanzar el volumen verde; el cual se determinó por el método de desplazamiento de agua, en una balanza de precisión 0,01 gr (Figura 10).

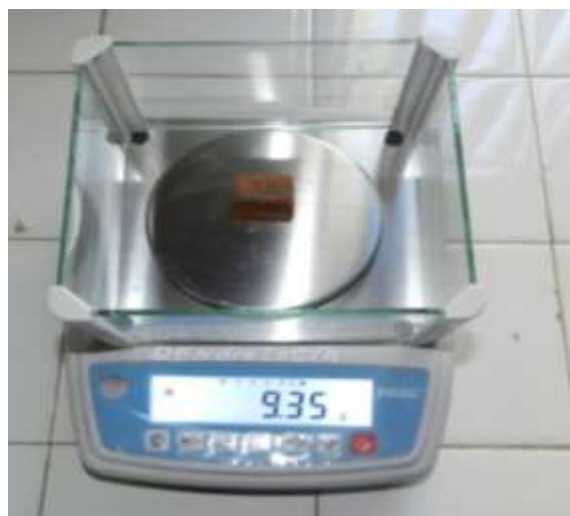


Figura 9 Peso anhidro de probetas.

Fuente: Autor (2020)



Figura 10 Obtención de volumen verde.
Fuente: Autor (2020)

3.4. Medición del color

3.4.1. Preparación de muestras

Para la medición del color, las 24 muestras de madera fueron de las siguientes dimensiones de 3 cm de ancho por 5 cm de espesor de cada muestra en dirección norte a sur a la altura del pecho. Estas muestras se acondicionaron a 22 °C y 60% de humedad relativa durante varias semanas hasta alcanzar un contenido de humedad de 11 a 12%. Las superficies de las muestras se lijaron con una lijadora portátil, se usaron lijas de granulometría de 40 a 250 (Figura 11). Finalmente las muestras se almacenaron en un lugar sin luz hasta su medición (Figura 12).



Figura 11 Probetas de madera lijadas.

Fuente: Autor (2020)



Figura 12 Conservación de probetas en ambientes sin luz.

Fuente: Autor (2020)

3.4.2. Determinación del color

La determinación del color se realizó mediante el sistema CIELab 1976, en el Laboratorio de Anatomía y Calidad de la Madera, Departamento de Ingeniería y Tecnología Forestal, Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil. Para medir numéricamente el color se utilizó un espectrofotómetro KONICA MINOLTA CM-5 (Figura 13), acoplado a un computador con el programa SpectraMagic NX. El iluminante utilizado fue D65, con una lámpara de xenón difusa que simula la radiación solar diurna, con un ángulo de observación de 10 grados.



Figura 13 Espectrofotómetro Konica Minolta CM-5.
Fuente: Autor (2020)

En cada probeta se tomaron 140 lecturas, 10 mediciones aleatorias en la albura, 40 en el duramen y 20 en la médula, en dirección lateral y transversal por árbol. Los parámetros colorimétricos utilizados fueron: L^* (luminosidad), a^* (coordenada del eje rojo-verde), b^* (coordenada del eje azul-amarillo), C (saturación) y h^* (ángulo de tinta) del sistema CIE-Lab 1976 (Figura 14). Para el cálculo de la saturación y ángulo de tinta, se utilizó el mismo procedimiento adoptado por Gonçalves (1993), Autran y Gonçalves (2006), por medio de las siguientes ecuaciones (1) y (2):

$$C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (1)$$

Dónde:

C = saturación

a^* = coordenada cromática sobre el eje verde-rojo

b^* = coordenada cromática sobre el eje azul-amarillo

El parámetro h^* (ángulo de tinta) fue determinado por la ecuación:

$$h^* = \arctang(b^* / a^*) \quad (2)$$

Dónde:

h^* = ángulo de tinta

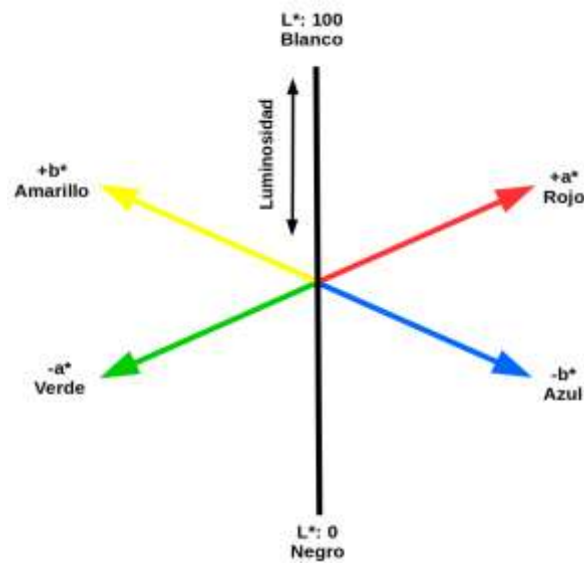


Figura 14 Esquema del sistema CIELab 1976

3.4.3. Variación del color entre rodales nativos y Plantación

En la determinación del color se tuvo en cuenta, que las muestras alcanzaran el contenido de humedad de equilibrio, como condición natural del color de la madera.

Para estudiar la variabilidad del color de la madera de rodales naturales respecto a la madera de plantación, se utilizó la ecuación (3), variación total del color, metodología adoptada por diversos autores (Meints *et al.*, 2017; Moya y Marín, 2011; Vanclay *et al.*, 2008) expresada en la siguiente ecuación:

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}. \quad (3)$$

Dónde:

ΔE^* = variación total del color

ΔL^* = variación de la luminancia (L^* en muestras de rodales naturales - L^* en muestras de plantación)

Δa^* = variación de la coordenadas rojo-verde (a^* en muestras de rodales naturales - a^* en muestras de plantación)

Δb^* = variación de la coordenadas amarillo-azul (b^* en muestras de rodales naturales - b^* en muestras de plantación)

Las observaciones positivas y negativas resultantes de la expresión significan: + ΔL^* aumento de la luminancia; - ΔL^* disminución de la luminancia; + Δa^* aumento en el color

rojo; $-\Delta a^*$ aumento en color verde; $+\Delta b^*$ aumento en el color amarillo; y $-\Delta b^*$ aumento del color azul.

La clasificación de la variación total del color, se aprecia en la tabla 2, fue elaborada por Hikita *et al.* (2001) que se basó en niveles de percepción del color y con la finalidad de clasificar los valores de variación de color, ΔE^* .

Tabla 2. Clasificación de la variación total del color (ΔE^*) de maderas.

Variación del color (ΔE^*)	Clasificación
0,0 - 0,05	Despreciable
0,05 - 1,5	Ligeramente perceptible
1,5 - 3,00	Notable
3,00 - 6,00	Apreciable
6,00 - 12,00	Muy apreciable

3.5. Determinación de anatomía del leño

Los preparados microscópicos se obtuvieron de acuerdo al protocolo del Laboratorio de Anatomía de la Madera (LAM, FCF-UNSE). Las láminas de madera se seccionaron con micrótopo de carro, con orientación transversal, longitudinales radial y tangencial; con un grosor entre 10-20 micrones, para obtener una sola hilera de células. Luego se deshidrataron en distintas concentraciones de alcoholes, luego con xilol y finalmente se los montó en entellán (Moglia y Giménez, 1998). Los tipos celulares se midieron sin realizar tinción por ser visibles, lo que permitió la observación clara de sus elementos.

La descripción de elementos anatómicos se realizó de acuerdo a las recomendaciones de la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA) (Wheeler *et al.*, 1989). Para efectuar las mediciones se empleó un microscopio Carls Zeiss utilizando objetivos de 10 x y 40 x.

Los elementos anatómicos medidos fueron: diametro de vasos, frecuencia de vasos, espesor de la pared de las fibras, longitud y ancho de radios, radios/mm lineal, proporción de tejidos, tipo de vasos y tipos de radios.

3.6. Análisis estadístico

3.6.1. Color

Para verificar las diferencias entre sitios y dentro de los árboles se empleó un modelo lineal mixto (ecuación 4), implementando una interfase de la plataforma R con InfoStat versión 2018, el método de estimación fue de máxima verosimilitud restringida (REML) (Di Rienzo *et al.*, 2011) con un nivel de confianza del 95%. El modelo empleado para el color es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \delta_j + \lambda_k + \rho_n + (\delta_j * \lambda_k) + (\delta_j * \rho_n) + (\lambda_k * \rho_n) + (\delta_j * \lambda_k * \rho_n) + k_i + \varepsilon \quad (4)$$

Y_{ijk} = variable respuesta relacionada a parámetros colorimétricos (L*; a*; b*; C; h*)

μ = Media general.

δ_j = Efecto fijo del j -ésimo sitio.

λ_k = Efecto fijo de la k -ésima sección del árbol.

ρ_n = Efecto fijo de la n -ésima región de la muestra.

$\delta_j * \lambda_k$ = Interacción entre el j -ésimo sitio y k -ésima sección.

$\delta_j * \rho_n$ = Interacción entre el j -ésimo sitio y n -ésima región.

$\lambda_k * \rho_n$ = Interacción entre k -ésima sección y n -ésima región.

$\delta_j * \lambda_k * \rho_n$ = Interacción entre el j -ésimo sitio, k -ésima sección y n -ésima región.

k_i = Efecto aleatorio del i -ésimo árbol.

ε = efecto aleatorio residual del modelo

Para todos los parámetros colorimétricos se empleó un modelo heterocedástico con varianzas heterogéneas para región; se utilizó la función de varianzas de identidad (VarIdent) para las varianzas de los errores.

3.6.2. Densidad básica y rasgos microscópicos

Para la densidad del leño y las características microscópicas se empleó un modelo lineal general mixto con efecto fijo de sitio y efecto aleatorio del árbol, donde:

$$Y_{ijm} = \mu + \delta_j + \beta_m + (\delta_j * \beta_m) + k_i + \varepsilon \quad (5)$$

Y_{ijm} = variable respuesta relacionada a características microscópicas o DB.

μ = Media general.

δ_j = Efecto fijo del j -ésimo sitio.

β_m = Efecto fijo de la m -ésima distancia.

$\delta_j * \beta_m$ = Interacción entre el j -ésimo sitio y m -ésima distancia.

k_i = Efecto aleatorio del i -ésimo árbol.

ε = efecto aleatorio residual error de estimación

3.6.3. Análisis de correlación

Se realizaron análisis de correlación de Pearson para determinar si existe algún grado de asociación entre las variables anatómicas, parámetros colorimétricos y densidad básica. Para las variables j -ésima y k -ésima la correlación se define según Di Rienzo *et al.* (2008) como:

$$r_{jk} = \frac{S_{jk}}{\sqrt{S_j^2 S_k^2}} = \frac{(\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)) / (n-1)}{\sqrt{((\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2) / (n-1)) (\sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2) / (n-1)}} \quad (6)$$

Dónde S_{jk} es la covarianza entre la variable j y la variable k , S_j^2 y S_k^2 son las varianzas de las variables j y k respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Colorimetría en la madera de *Prosopis alba*

Los valores de los parámetros colorimétricos presentados en este estudio para *Prosopis alba*, muestran los cambios ocurridos en los valores colorimétricos de las muestras obtenidas de cuatros sitios distintos (3 rodales semilleros de bosques nativos y una plantación), esto permitió observar los posibles cambios en tres regiones de la muestra (albura, duramen y médula) y en las secciones lateral y transversal en la especie.

En la Tabla 3, se observa que los valores de todos los parámetros colorimétricos son positivos, por lo que la composición del color para *Prosopis alba* en el duramen se puede clasificar en tonos oscuros ($L^* < 56$), rojos y amarillos ($6,63 < a^* < 14,03$ y $10,69 < b^* < 22,66$). Los resultados mostraron que el duramen y la albura tienen grandes rangos de variación de color, mientras que entre duramen y médula, los parámetros colorimétricos mantienen similares niveles.

La luminosidad varía entre 36 a 83 en la albura mientras que en el duramen y médula la variación fue menor entre 37 a 65. El pigmento rojo ($+a^*$) mantuvo niveles entre 1,53 a 12,78 en la albura, siendo en el duramen y médula levemente superiores entre 6 a 14. El pigmento amarillo (parámetro $+b^*$) tanto en la albura como en el duramen y médula presentó niveles superiores que el parámetro a^* (Tabla 3), por lo que estos dos parámetros serían determinantes en el color de la madera de esta especie. Tanto la saturación (C) como el ángulo de tinta (h^*) fueron superiores en la albura.

Tabla 3. Estadística descriptiva de los parámetros colorimétricos (L*, a*, b*, C, h*) en las distintas regiones de la madera de *Prosopis alba*.

Región	Rasgo	n	Media	CV	Mín	Máx
Albura	L*	480	67,26	12,26	36,28	83,19
	a*	480	6,38	34,92	1,53	12,78
	b*	480	27,17	20,41	13,25	42,1
	C	480	28,05	18,66	15,47	42,37
	h*	480	76,13	7,86	58,94	87,24
Duramen	L*	1920	54,38	8,24	37,97	64,28
	a*	1920	10,05	11,61	6,63	14,03
	b*	1920	17,61	12,12	10,69	22,66
	C	1920	20,29	11,51	12,58	26,51
	h*	1920	60,23	3,21	50,5	66,32
Médula	L*	480	54,83	8,07	43,08	65,33
	a*	480	10,23	10,5	7,78	13,03
	b*	480	17,96	12,73	10,24	23,82
	C	480	20,68	11,56	12,87	27,15
	h*	480	60,21	3,83	50,57	65,05

L*: rango de negro o blanco, donde blanco=100 y negro= 0

a*: rango de verde a rojo, donde un valor negativo= más verde y un valor positivo= mayor pigmento rojo.

b*: rango de azul a amarillo, donde un valor negativo= azul y un valor positivo= amarillo

La luminosidad media del duramen (L*) fue ligeramente más baja (color más oscuro) que la reportada por Bradbury *et al.* (2010) y Nicholas *et al.* (2007) en *Acacia melanoxylon* R.Br., mientras que el contenido de pigmento rojo (a*) y amarillo (b*) fueron similares. En este estudio se aprecia en la albura menor luminosidad (L*) acompañado de un mayor contenido de pigmentación roja (a*) y amarilla (b*) respecto a lo observado por Bradbury *et al.* (2010) y Lourenço *et al.* (2008) en otras leguminosas.

Estudios colorimétricos similares con CIELab abordados por Silva *et al.* (2015) en ocho especies nativas de Brasil, mostraron luminosidades análogas a la muestra de Los Arias, en *Cedrela fissilis* Vell (cedro) con valores de 57,86. Camargo y González (2001) consideró oscuro el color de las maderas cuyo valor de L* muestre valores ≤ 56 y como color claro, el valor de L* > 56 . En este contexto, el duramen y médula del algarrobo blanco fue oscuro, mientras que la albura fue clara (> 56).

El rango de variación entre el valor mínimo y máximo para luminosidad (L*), pigmento rojo (a*) y pigmento amarillo (b*) de las muestras de madera de *Prosopis alba*, coincide con el rango de valores observado por otros autores Nicholas *et al.* (1994), Moya *et al.* (2012) en otras especies de leguminosas. Sin embargo, en la albura este rango supera al descrito en la bibliografía de otras leguminosas, esto puede deberse a compuestos químicos, alteraciones de la albura, o características intrínsecas de la especie.

La albura de *Prosopis alba* es notablemente clara con valores de luminosidad de hasta 83,29, y bajos valores de pigmento rojo con media general de 6,38. En la albura, los valores a^* tuvieron la mayor variabilidad, con un coeficiente de variación de 34,92% (Tabla 3). Valores similares en albura fueron observadas por Bradbury *et al.* (2010) en *Acacia melanoxylon*. Por su parte, Moya y Berrocal (2010), Moya y Calvo-Alvarado (2012) mencionan coeficientes de variación similares para este parámetro en la albura de *Tectona grandis* con coeficientes $>31\%$, lo que indica que el parámetro a^* es muy variable.

Gierlinger *et al.* (2004) considera que el cambio de color de la albura al duramen se debe a la síntesis y acumulación de sustancias extractivas durante la formación del duramen; la variación en el color dentro del duramen se debe a las reacciones de oxidación y polimerización que tienen lugar a medida que la madera envejece.

Las variaciones colorimétricas observadas en las tres regiones de estudio (albura, duramen y médula) pueden explicarse, además por la variación en los niveles de reflectancia alcanzados en cada región. La figura 15, muestra que los niveles de reflectancia en la albura a partir de los 410 nm son muy superiores a los alcanzados por duramen y médula, donde estas dos últimas regiones presentaron los valores más bajos de L^* y b^* respecto a la albura (Tabla 3). Si bien los niveles de reflectancia pueden ser afectados por múltiples factores como tipos y cantidad de contenidos presentes en las células y la proporción de tejidos. Esta tesis solo se centrará en los rasgos anatómicos.

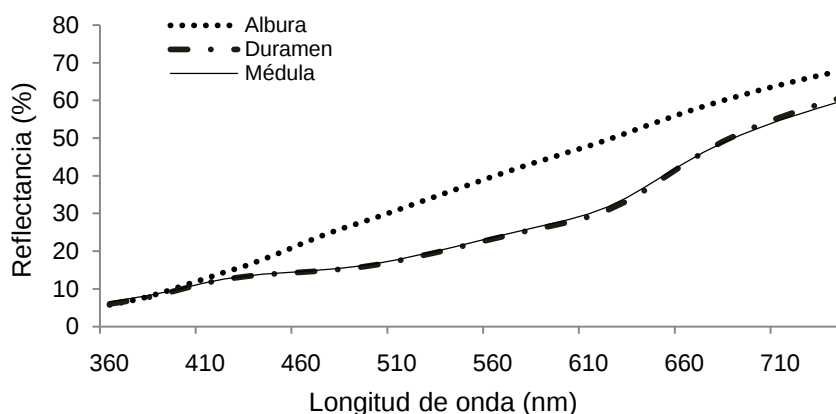


Figura 15 Curvas de reflectancia en las distintas regiones de la madera en función de las longitudes de onda.

Fuente: Autor (2020)

Los valores promedios de los parámetros del color y los coeficientes de variación (CV%) en el duramen se muestran en la Figura 16. Con respecto al parámetro L^* , se observa que árboles de mayor claridad (mayor L^*) mostraron tener menor variabilidad, mientras que árboles con valores de L^* más bajo mostraron la mayor variabilidad (Figura 16a),

esta tendencia tuvo un comportamiento similar para el parámetro b^* (Figura 16c). En relación con el pigmento rojo (a^*), no se encontró una tendencia clara con el coeficiente de variación (CV%) (Figura 16b).

Existe una relación estadísticamente significativa ($r = -0,42$; $p < 0,0001$) entre el valor del parámetro L^* y su coeficiente de variación. En otras palabras, el bajo brillo (L^*) en los árboles se correlaciona con la alta variabilidad con respecto a este parámetro. A efectos prácticos, la luminosidad de la madera mostrará baja variabilidad a pesar de una alta claridad, para estos sitios y especie analizada. Estas tendencias entre L^* y el CV% también fueron observadas por Moya y Marín (2011) en 20 clones de *Tectona grandis*, siendo el coeficiente de determinación algo superior ($R^2 = 0,49$) al registrado en este estudio. A diferencia de la luminosidad L^* , los valores de a^* no se correlacionaron significativamente con el CV% ($r = -0,13$, $p = 0,2$). Moya y Marín (2011) tampoco encontraron una tendencia clara entre a^* y CV%, ellos reportaron un $R^2 = 0,0137$ similar al encontrado en este estudio.

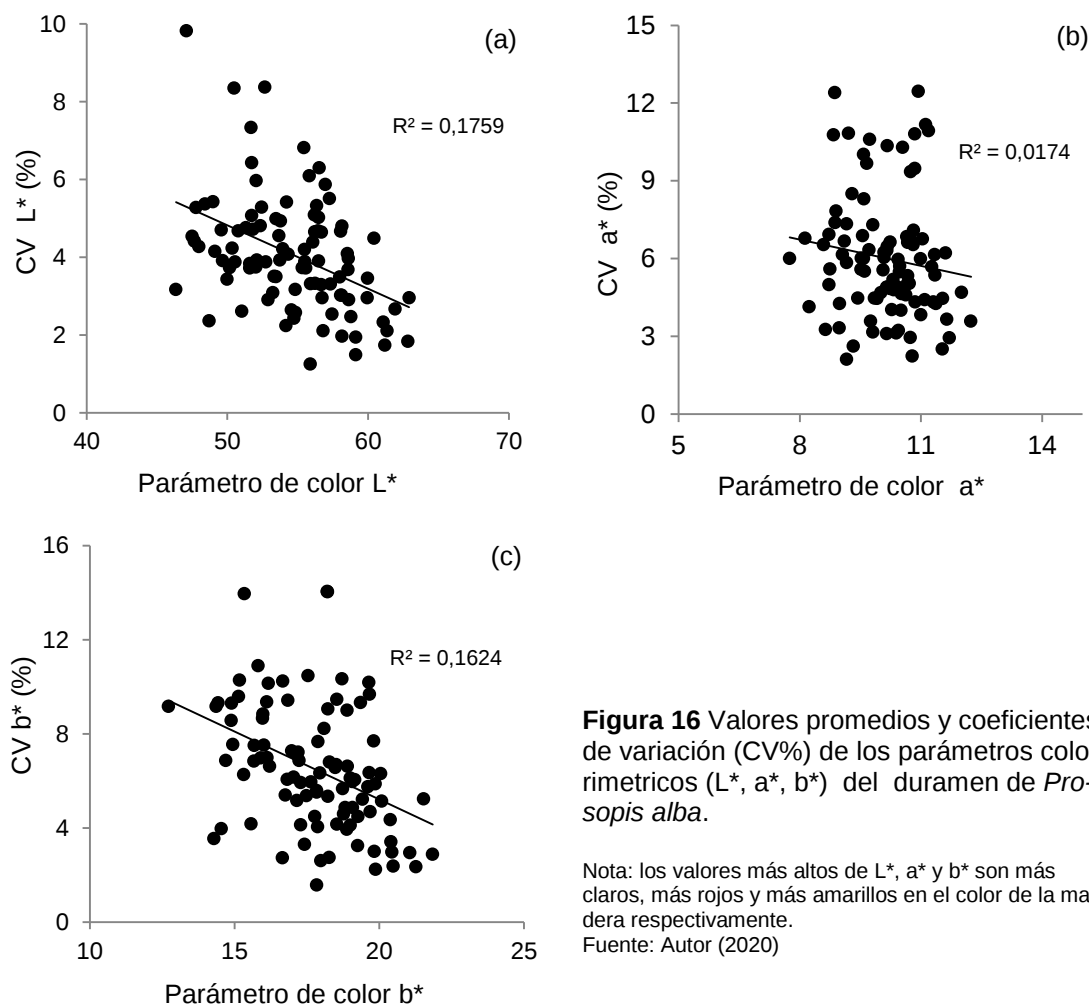


Figura 16 Valores promedios y coeficientes de variación (CV%) de los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^*) del duramen de *Prosopis alba*.

Nota: los valores más altos de L^* , a^* y b^* son más claros, más rojos y más amarillos en el color de la madera respectivamente.

Fuente: Autor (2020)

En la tabla 4, se aprecia que las muestras de la plantación tuvieron una luminosidad media superior al de rodales nativos en las tres regiones (albura, duramen y médula). En cuanto a la pigmentación roja (a^*), la albura presentó los valores más bajos en relación al duramen y médula, no existiendo grandes diferencias entre rodal nativo y plantación. En el parámetro b^* , la albura presentó los valores más elevados en relación al duramen y médula, donde este rasgo disminuyó un 32,37 y 28,58% en bosques nativos y un 28,76 y 23,34% en plantación, respectivamente.

Tabla 4. Valores promedios y coeficiente de variación (CV%) de los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C, h^*) según tipo de formación y región de la muestra de madera.

Región	Tipo de Formación	L^*		a^*		b^*		C		h^*	
		Media	CV%	Media	CV%	Media	CV%	Media	CV%	Media	CV%
Albura	Nativo	66,73	12,53	6,75	33,23	26,47	20,57	27,47	18,68	75,04	8,04
	Plantación	69,71	10,99	6,76	34,91	25,07	13,28	26,10	11,99	74,67	7,71
Duramen	Nativo	55,11	7,77	10,24	10,54	17,90	11,45	20,63	10,70	60,17	3,26
	Plantación	56,66	7,45	9,87	9,46	17,86	10,39	20,41	9,56	61,00	3,37
Médula	Nativo	55,54	7,84	10,38	9,54	18,10	12,65	20,89	11,18	60,00	4,13
	Plantación	57,75	7,01	10,34	9,25	19,22	8,70	21,83	8,38	61,69	2,57

Estudios colorimétricos similares abordados por Nicholas *et al.* (2007) en plantaciones ubicadas en seis sitios en Isla Norte de Nueva Zelanda, observaron valores análogos a los de la plantación (San Isidro) en los parámetros L^* , a^* y b^* , con valores promedio de 58,7; 9,1 y 18,8 respectivamente. El coeficiente de variación en general, fue relativamente bajo, para los distintos parámetros de color al igual que lo observado por Nicholas *et al.* (2007). Por su parte, Moya y Marín (2011) encontraron que la mayoría de los clones de *Tectona grandis* analizados colorimétricamente, mostraron un color de madera mucho más claro que la madera de los bosques nativos de Myanmar (Thulasidas *et al.*, 2006), considerados de calidad superior. Patrones similares fueron observados en el presente estudio.

En la Figura 17, se observa que la luminosidad (L^*), la pigmentación amarilla (b^*), la saturación (C) y el ángulo de tinta (h^*) tuvieron similares comportamientos, una tendencia decreciente desde la corteza hacia la médula para las distintas secciones y regiones. En todos los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C, h^*), las muestras de madera en el duramen y médula, exhibieron valores levemente inferiores en sección transversal respecto al lateral.

Estudios similares llevados a cabo por Barros *et al.* (2014) en tres especies forestales de Amazonia, observaron disminuciones de todos los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* ,

C, h*) en el plano transversal en relación a los planos radial y tangencial. Este comportamiento también fue registrado por Atayde *et al.* (2011) en *Brosimum sp.* y Nishino *et al.* (2000) en 26 especies de madera dura. Gonçalves *et al.* (2001) mencionan que en la sección transversal, la presencia de los anillos de crecimiento aumenta el nivel de gris, generando una disminución de la luminosidad (L^*) y de los matices responsables de las coordenadas a^* y b^* , visualizando una madera más oscura en esta sección. En base a los resultados obtenidos en este estudio, las tonalidades más oscuras en sección transversal, pueden ser debido a las sustancias de menor reflectancia presentes en los vasos y las paredes celulares de las fibras. Giménez *et al.*, (2000; 1998) reportaron que anatómicamente *Prosopis alba*, se caracteriza por presentar oclusión parcial de los poros por presencia de gomas en 10-30%.

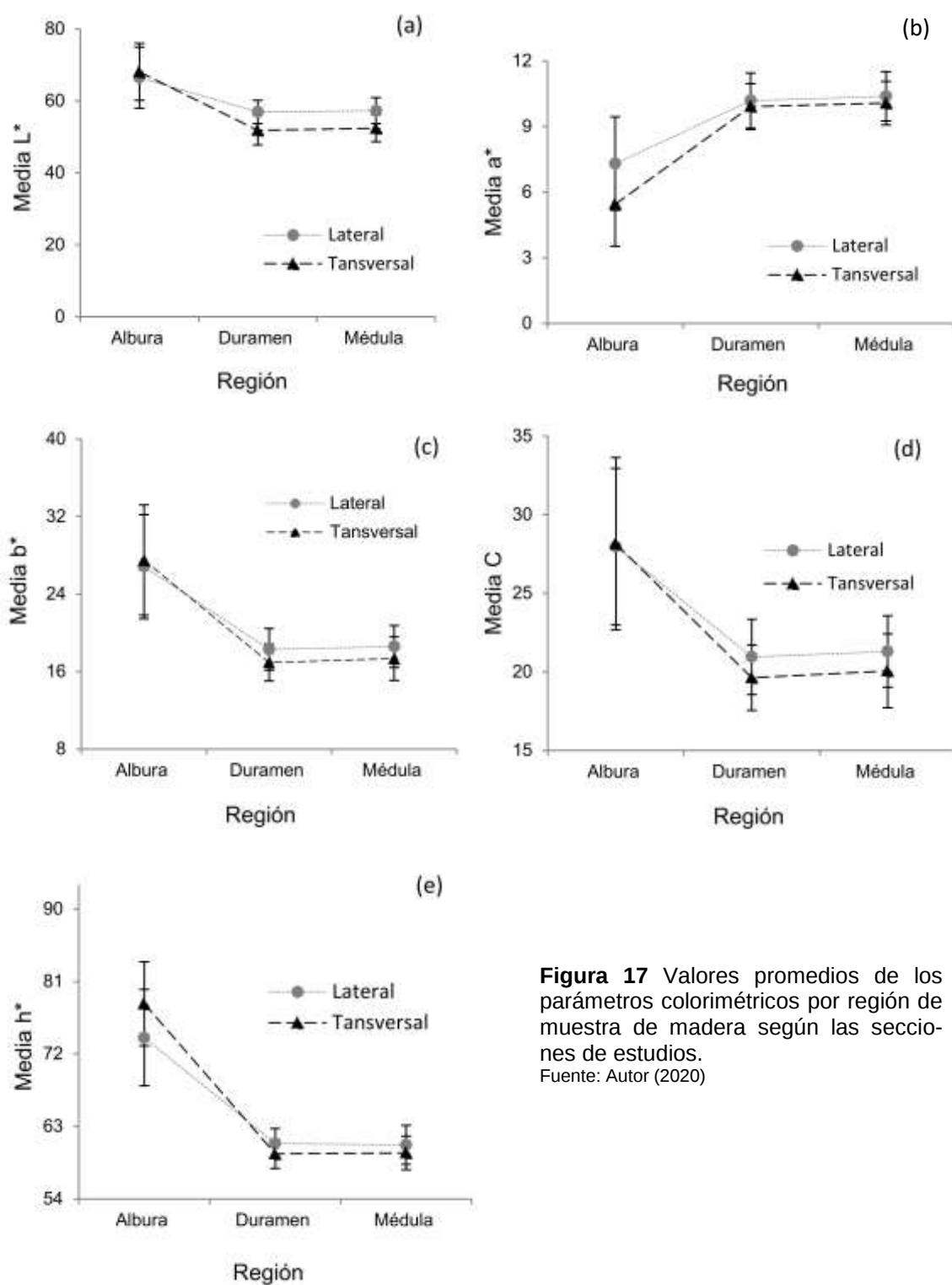


Figura 17 Valores promedios de los parámetros colorimétricos por región de muestra de madera según las secciones de estudios.

Fuente: Autor (2020)

En cuanto al parámetro a^* (pigmentación roja) (Figura 17b), se observa un aumento desde la corteza hacia la médula, siendo levemente superior en la superficie lateral. De acuerdo con González *et al.* (2001), la coordenada a^* , cuando es positiva y creciente, significa una coloración rojiza más pronunciada y cuando la coordenada b^* aumenta, significa la presencia de un color amarillento más acentuado. En esta investigación, la coordenada b^* (pigmento amarillo) representa predominancia en la albura, mientras que en el duramen se acentúa el pigmento a^* lo cual es marcado en *Prosopis alba*.

En la albura los parámetros L^* , b^* , C mantienen similares niveles entre las secciones de estudio. Sin embargo, el ángulo de tinta en la albura presenta valores superiores en sección transversal (Figura 17e), probablemente por la fuerte influencia de la luminosidad de las muestras (L^*), ya que este parámetro fue superior en esta sección.

El CV% en general tuvo valores bajos para todos los parámetros colorimétricos < 20,7%, excepto el parámetro a^* donde se registraron CV% de hasta 35,3% en la albura.

En la Figura 18, se observan los valores de reflectancia en las distintas secciones estudiadas, para cada región en el espectro visible. La reflectancia aumenta conforme aumentan las longitudes de onda, varía entre 5 y 69%. Este porcentaje se presentó de la siguiente forma en las distintas secciones de estudio: la albura en la sección transversal y lateral, varió en forma similar entre 5-6 a 66% (Figura 18a), lo cual puede ser explicado por la escasa variación de los parámetros L^* , b^* y C en ambas secciones (Figuras 17a, 17c, 17d). Sin embargo, el duramen y la médula en sección lateral mostraron mayor reflectancia (duramen= 6,2-67,6%; médula= 6,9-66,1%), que en sección transversal (duramen= 5,7-53,2%, médula= 6-52,8%) (Figuras 18b y 18c). Estos valores de reflectancia variaron conforme el valor de L^* aumenta o disminuye en el duramen y médula (Figura 17). Es decir, la curva para la sección transversal refleja menos luz que la sección lateral. Esto puede explicarse, en parte, por el menor valor de la claridad (L^*) y pigmento amarillo (b^*) en esta sección respectivamente.

Se observa además que en las dos secciones las longitudes de onda de mayor reflectancia, en el duramen y médula, están en la banda 620 a 725 nm (Figura 18). Justamente el rango de colores amarillo-naranja-rojo. La sección lateral del duramen y médula en esta banda, es la que tiene mayor reflectancia, mientras que la sección transversal al ser más oscura, tiene una mayor capacidad de absorción de la radiación, esto es lo que genera una mayor y menor claridad en estas dos secciones respectivamente. Tendencias similares fueron observadas por Atayde *et al.* (2011) en *Brosimum* sp. Por su parte, Romagnoli

et al. (2013) también observaron en *Tabebuia serratifolia*, que al aumentar la longitud de onda, también aumenta la reflectancia, y las diferencias entre las distintas zonas cromáticas se hacen más evidentes, esto es análogo a lo observado en este estudio.

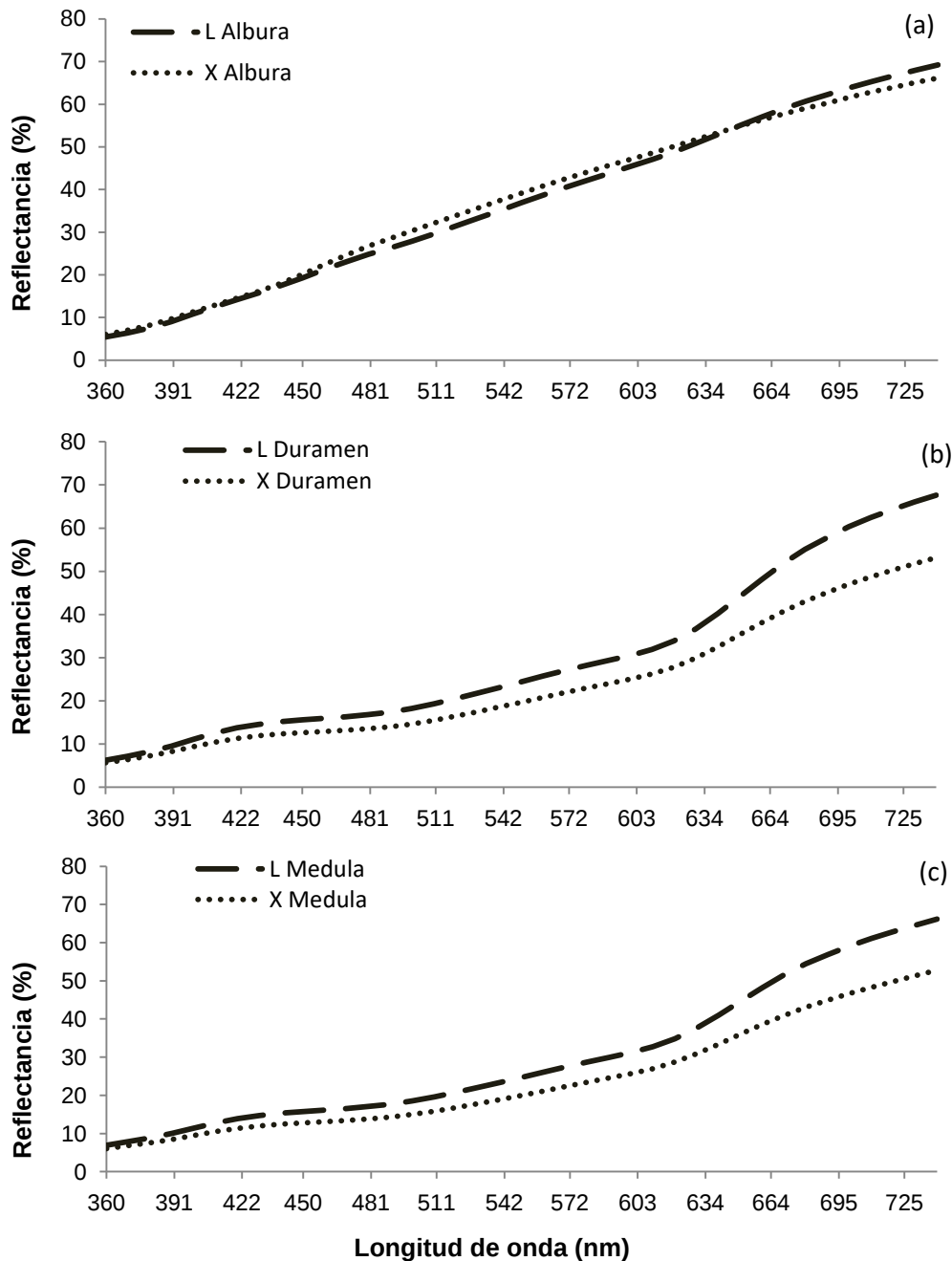


Figura 18 Curvas de reflectancia de la madera de algarrobo blanco (*Prosopis alba*) en función de las longitudes de onda, discriminado por secciones lateral (L) y transversal (X).

Fuente: Autor (2020)

4.2. Variación de rasgos colorimétricos en la madera de *Prosopis alba*, entre sitios y dentro del árbol.

En la tabla 1 (ANEXO I), se muestran los valores promedios de los parámetros colorimétricos de cada región de la muestra, discriminados por sitio.

El ANOVA para propiedades de color del duramen se presenta en la tabla 2 (ANEXO I). Existen diferencias significativas entre los sitios estudiados, sección y regiones de la troza de madera en relación con los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) $p < 0,05$, por el test de promedios de Fisher al 5% de error. El modelo cumple los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. De acuerdo con los resultados de la tabla 3 (componentes de varianza, ANEXO I) es interesante resaltar que la variabilidad del árbol para todos los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) es menor que la variabilidad residual, siendo la variabilidad debido al árbol menor al 10% respecto a la variabilidad relativa total.

En el presente estudio, se encontró una variación significativa en algunos parámetros colorimétricos (Tabla 2, ANEXO I). El análisis de la varianza entre los sitios, sección y región mostraron diferencias significativas $p < 0,05$ en la interacción *sitio x región* para todos los parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*), mientras que en la interacción *sección x región* solo resultaron significativos los parámetros L^* , a^* y h^* , indicando que las fuentes de variación estudiadas no actúan independientemente.

En la **coordenada L^*** fue significativa tanto para *sitio x región* ($p = 0,0081$) y *sección x región* ($p < 0,0004$) de las muestras de madera. En cuanto a la primera interacción, en la Figura 19, se observa una clara diferenciación entre la luminosidad de la albura y duramen-médula. La luminosidad de la albura, de Villa Ángela, difiere estadísticamente ($\alpha = 0,05$) de las restantes poblaciones de *Prosopis alba*, no existiendo diferencias significativas en este último grupo. En cuanto al duramen y médula no existen diferencias significativas entre estas dos regiones. Sin embargo, es posible apreciar que la plantación (localidad de San Isidro) difiere estadísticamente de los rodales naturales, siendo la plantación quien presentó la media más elevada, apreciándose que en rodales naturales, existe una tendencia de oscurecimiento en la madera, excepto en la albura.

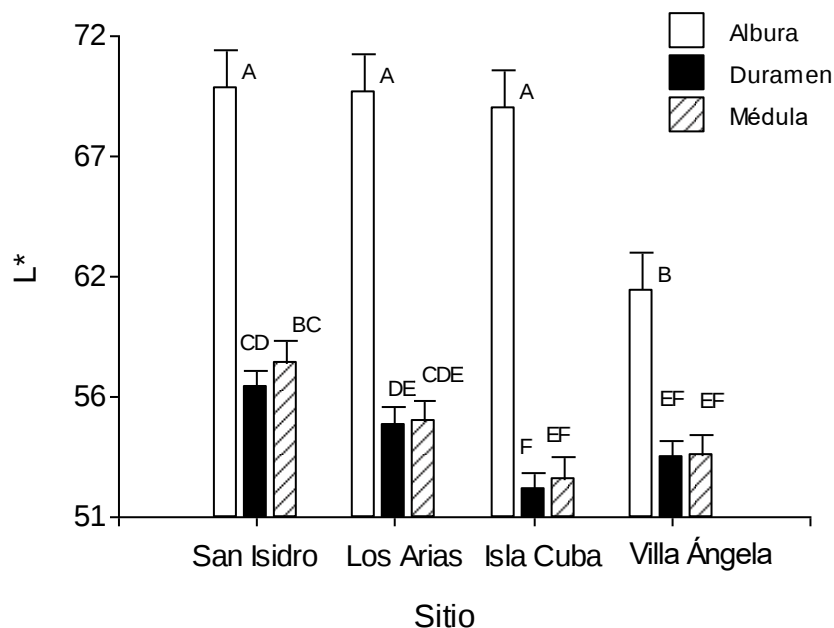


Figura 19 Medias ajustadas y errores estándares para la interacción *sitio x región* del parámetro de luminosidad (L^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$)

Fuente: Autor (2020)

Radialmente se aprecia (Figura 19) que el parámetro L^* disminuye en el duramen, y luego aumenta el valor de luminosidad abruptamente en la albura, esta tendencia puede deberse, en parte, a la pigmentación amarilla presente tanto en la albura como en la médula en estas secciones ya que el parámetro b^* , exhibe valores levemente superiores en la médula y muy elevados en la albura, existiendo además diferencias entre sitios tanto en la albura como en el duramen.

Variaciones en este rasgo colorimétrico también fue observado por Moya y Marín (2011) en clones de *Tectona grandis*. Nelson *et al.* (1969), citado por Hiller *et al.* (1972) mencionan que las propiedades del suelo afectan el color y blancura de la madera de nogal negro, observando diferencias en la luminosidad según el sitio analizado. Por su parte, Boudouaya *et al.* (2017) también encontraron diferencias significativas en la luminosidad, en *Pistacia atlantica* Desf. provenientes de dos regiones de muestreo que difieren en términos de suelo, clima y altitud. Tendencias análogas también fueron reportadas por Nicholas *et al.* (2007) en el duramen *Acacia melanoxylon*, plantados en distintos sitios.

Maeglin y Nelson (1970) citado por Hiller *et al.* (1972) no encontraron diferencias estadísticamente significativas en el color de la madera (es decir, la luminancia) entre las diferen-

tes clases de sitios. Sin embargo, observaron que los árboles con un duramen más oscuro y rojo tienden a encontrarse en sitios más pobres.

Los resultados de dos estudios sobre las propiedades del duramen de nogal negro han demostrado que la variación entre los árboles dentro de los rodales es mayor que la variación entre los árboles de diferentes rodales (Nelson 1976; Phelps *et al.* 1983 citado por Hiller *et al.* 1972). Tales patrones de variación se interpretan tradicionalmente como indicadores de que el control genotípico sobre un rasgo dado es más importante que el efecto ambiental.

Villegas (2009), por su parte también analizó colorimétricamente la madera maciza en *Salix*, donde encontraron que el sitio más protegido de inundaciones presenta maderas más blancas y luminosas que el sitio sometido a inundaciones frecuentes. Estas observaciones coinciden con lo observado colorimétricamente en este estudio, ya que los sitios de las provincias de Chaco y Formosa (Regiones del Litoral) según Celis (2006), el desastre más recurrente son las inundaciones con 63% del total de las fichas de desastre (entre 1970-2004), éstas pueden ser algunas de las causas por los cuales tanto las muestras Villa Ángela, Chaco como Isla cuba, Formosa, presentan tendencias colorimétricas más oscuras (bajos valores de luminosidad L^*) que los dos sitios en Santiago del Estero, los cuales son más áridos. Esto es similar con lo observado por Sotelo Montes *et al.* (2008) donde encontraron diferencias significativas en L^* y a^* según las zonas de plantación de *Calycophyllum spruceanum*, caracterizadas por disímiles niveles de fertilidad y humedad del suelo.

Esto es un rasgo importante a la hora de obtener la materia prima para productos elaborados, ya que dependiendo del sitio y si es rodal nativo o plantación, el color de la madera puede variar y ser más clara u oscura.

El cuanto al análisis de la varibilidad del color en las secciones de estudios discriminado por región (albura, duramen, médula), fue significativo al 95% de confianza. Como se observa en la Figura 20, la albura no presentó diferencias significativas entre las secciones de estudio; mientras que los valores medios del duramen y médula difieren entre secciones, estas regiones (duramen y médula) no difieren estadísticamente entre sí en la misma sección de estudio. Esto muestra, que en sección lateral el color de la madera del duramen y médula en *Prosopis alba* es mas claro ($L^* > 56$) que en la sección transversal. Estudios colorimétricos desarrollados por Santos (2018) en distintas procedencias de maderas de “tacuari” (familia Lecythidaceae), mostraron en general

diferencias significativas en el duramen entre secciones transversal y longitudinal, siendo algo superior la luminosidad en sección longitudinal, al igual que en el presente estudio. Estas tendencias también fueron reportadas por Nishino *et al.* (2000)

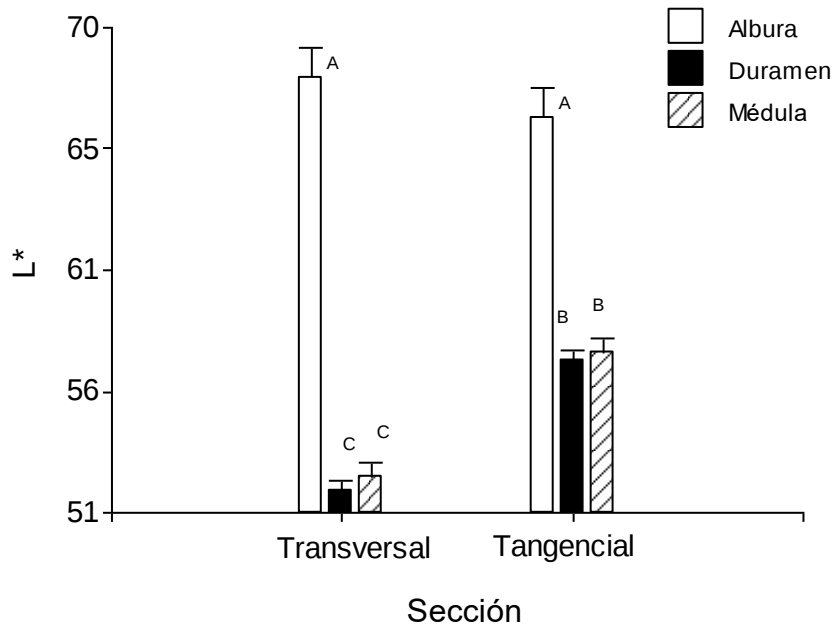


Figura 20 Medias ajustadas y errores estándares para la interacción *sección x región* del parámetro de luminosidad (L^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).

Fuente: Autor (2020)

En la **coordenada a *** (**pigmentación roja**), tuvo niveles superiores en el duramen y médula respecto a la albura. En la Figura 21, se observa que en general los distintos sitios mantuvieron similares niveles de pigmentación roja (mayor coordenada a *) tanto en el duramen como en la médula, existiendo pequeñas diferencias estadísticas significativas, a un 95% de confianza, entre el duramen de las muestras de Isla Cuba en relación al duramen y médula de las muestras de Villa Ángela y Los Arias que fueron de mayor valor (> coordenada a *). El valor más bajo de este parámetro, se observó en la albura de Isla Cuba que fue significativamente menor que en Villa Ángela, donde se registraron las temperaturas medias más altas y bajas respectivamente.

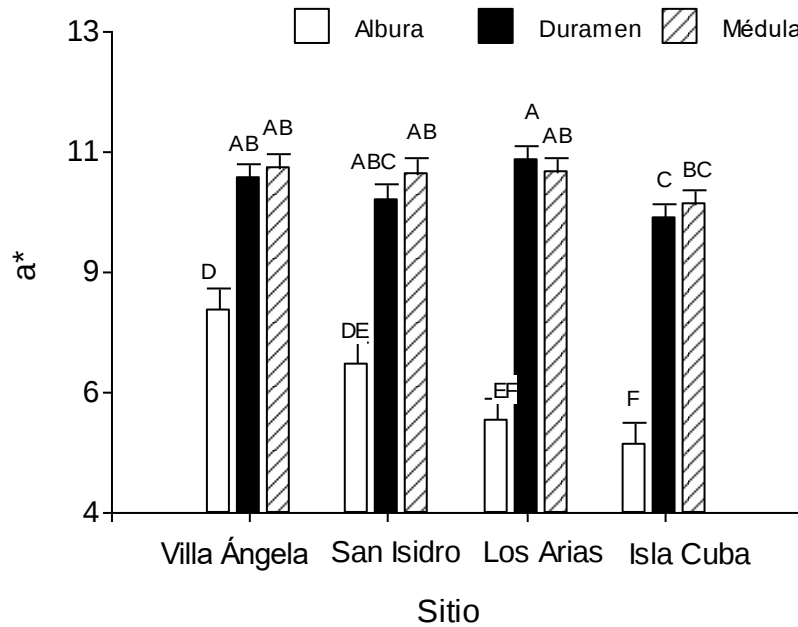


Figura 21 Medias ajustadas y errores estándares para la interacción *sitio x región* del pigmento rojo (a^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).

Fuente: Autor (2020)

Investigaciones efectuadas por Silva *et al.* (2017) en treinta especies tropicales encontraron similares valores de coordenada cromática a^* en el duramen de *Bagassa guianensis* Aubl. y *Clarisia racemosa* Ruiz con coordenada cromática rojo de 10,87 y 9,78, respectivamente. Autores como Bradbury *et al.* (2010), Lourenço *et al.* (2008), Bradbury (2005) también reportaron similares niveles de pigmento rojo en el duramen de *Acacia melanoxylon* (acacia negra). Por su parte, Nicholas *et al.* (2007), evaluaron la influencia del sitio en las propiedades del color en la madera de acacia negra de 18 años donde reportaron diferencias significativas en este parámetro (a^*) entre los sitios analizados, sin embargo este parámetro no tuvo grandes variaciones entre los sitios al igual que lo observado en el presente estudio. Esto también fue reportado por Sotelo Montes *et al.* (2008), donde las zonas de plantación en *Calycophyllum spruceanum* produjeron pequeñas diferencias significativas en el tono rojizo (a^*) de las muestras.

Estudios llevados a cabo por Garcia *et al.* (2014) mencionan que la coordenada a^* es la principal responsable de la alteración del color entre las especies y las caras de cada especie. De acuerdo a lo que se observa en la Figura 22, existe diferencias estadísticas significativas ($p<0,05$) entre la médula en sección lateral y el duramen de la sección transversal, no existiendo diferencias significativas entre el duramen y médula en la misma sección de estudio ($p>0,05$). En la albura el pigmento rojo (a^*) fue significativamente superior en sección lateral respecto al transversal. Costa *et al.* (2010), mencionan que

valores superiores a 10 para esta coordenada a^* , permite que el tono rojizo se manifieste de forma más pronunciada en relación a la coordenada b^* (pigmento amarillo). Lo que puede explicar en parte el color del duramen en relación a la albura. El duramen y médula presentan valores de este parámetro que rondan en 10 (Figura 22), por lo que la coloración puede deberse en parte a la participación de esta coordenada en estos niveles. Atayde *et al.* (2011) encontraron diferencias significativas para este parámetro entre las secciones de estudio de la madera *Brosimum* sp.

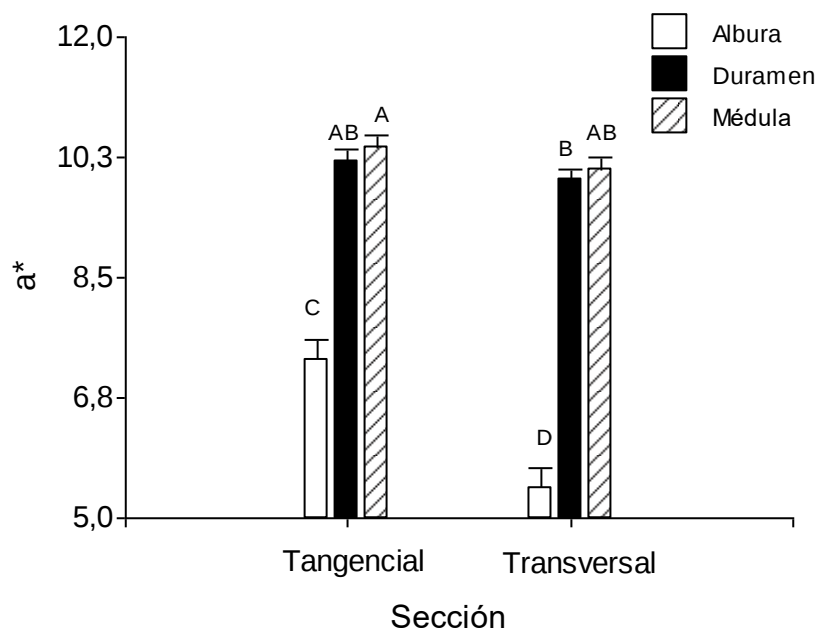


Figura 22 Medias ajustadas y errores estándares para la interacción sección $\times$ región del pigmento rojo (a^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).

Fuente: Autor (2020)

En cuanto a la **coordenada b^*** , en el duramen y médula, se observa que las muestras de Santiago del Estero, (Los Arias y San Isidro) tuvieron mayor cantidad de pigmento amarillo respecto a las muestras de Isla Cuba y Villa Ángela (menor b^*) (Figura 23), siendo el duramen de Los Arias significativamente diferente de Villa Ángela e Isla Cuba, estos dos últimos de mayor precipitación media anual. Sitios más áridos mostraron patrones colorimétricos similares entre sí, aún siendo rodal nativo y plantación, respectivamente. Entre las secciones de estudio este rasgo no difiere estadísticamente. Thulasidas *et al.* (2006) midieron la variación del color del duramen de *Tectona grandis* en localidades húmedas y secas de la India y encontraron que únicamente el pigmento amarillo (b^*) era diferente estadísticamente entre estas localidades. Nicholas *et al.* (2007), Moya y Berrocal (2010) también observaron diferencias significativas de este parámetro entre sitios.

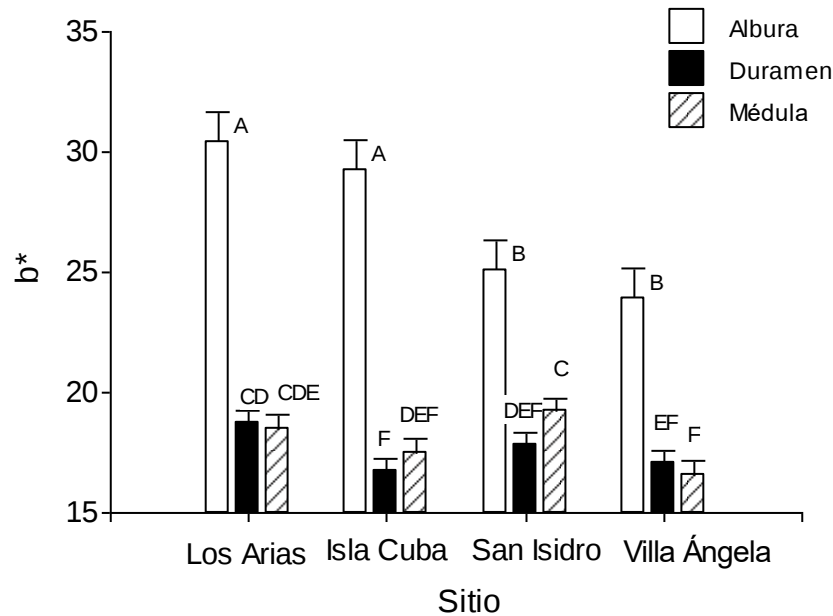


Figura 23 Medias ajustadas y errores estándares para la interacción *sitio x región* del pigmento amarillo (b^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).

Fuente: Autor (2020)

Entre secciones el parámetro b^* no mostró diferencias estadísticas significativas (Tabla 2, ANEXO I). Investigaciones efectuadas por Orellana (2015) en *Tachigali vulgaris* plantados en dos sitios tampoco encontraron diferencias significativas entre secciones radial y tangencial para este parámetro.

Estos resultados probablemente indican que el pigmento amarillo en *Prosopis alba* (el cual incide directamente en la luminosidad) se ve más afectada por el tipo de suelo, la fertilidad y las condiciones climáticas que la coordenada a^* . En este sentido el parámetro b^* fue más sensible a las condiciones de sitio, sin embargo se necesitan correlaciones más confiables entre datos climático u edafológicos y estas coordenadas cromáticas. La albura fue entre 1,8 a 1,4 veces más clara que el duramen y médula, lo que muestra la gran variabilidad entre regiones dentro de un mismo individuo. Esto sugiere que el cambio de color en la madera, tanto dentro de los árboles como entre sitios, podría preverse en el momento de comprar materia prima para generar productos elaborados según las preferencias del mercado.

La **saturación C** (Figura 24), muestra que la región de la albura tuvo mayor saturación que el duramen y médula, no existen diferencias significativas entre estas dos últimas regiones de la muestra, excepto San Isidro, donde la saturación de la médula fue significativamente mayor respecto al duramen. Este comportamiento en la saturación puede

estar explicado por los aumentos y disminuciones de la coordenada b^* , ya que Camargos y Gonçalves, (2001), mencionan que la saturación tiene gran correlación con el matiz amarillo (b^*). Por su parte, Barros *et al.* (2014) ratifican este comportamiento y mencionan que la saturación es influenciada por las coordenadas a^* y b^* , con aumentos en estas dos variables, los valores de saturación también aumentan. En ese caso, el mayor valor observado de C fue en la albura con valores entre de 25 y 31 para los distintos sitios. Giménez *et al.* (1998), en estudios microscópicos en *P. alba* revelan que la albura presenta vasos sin ningún tipo de obstrucción, lo que podría explicar el hecho de que la albura presenta una coloración más clara y saturada, por la disminución de sustancias de tinción como gomas, tilídes y taninos.

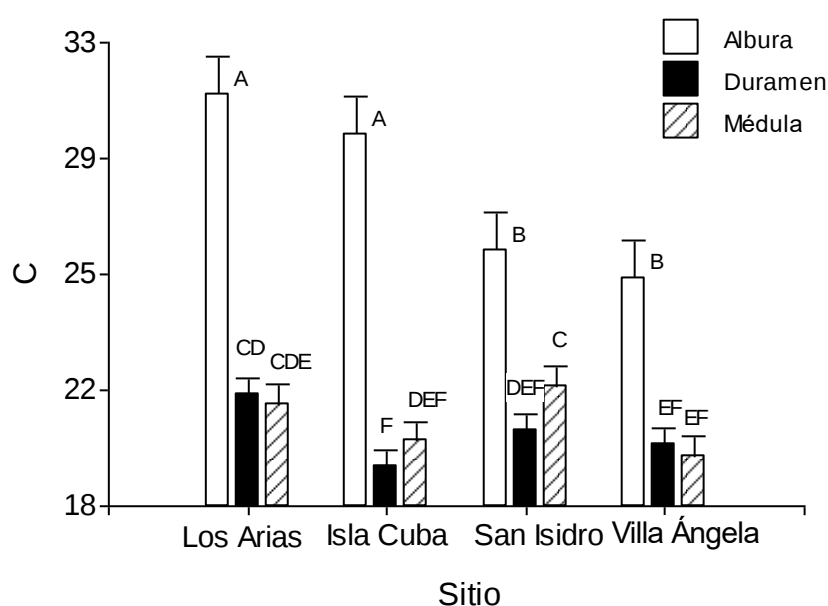


Figura 24 Medias ajustadas y errores estándares para la interacción *sitio x región* de la saturación (C) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).

Fuente: Autor (2020)

En la tonalidad, dada por el **ángulo de tinta (h^*)** en el sistema CIELab 1976 (Figura 25), se aprecia que la albura del grupo de muestras de Isla Cuba y Los Arias, difieren significativamente del grupo de muestras de Villa Ángela y San Isidro (Figura 25a). El ángulo de tinta del duramen y médula de Isla Cuba, Los Arias y San Isidro, mantiene similares tonalidades, no existiendo diferencias significativas entre estas regiones y sitios. Sin embargo, el grupo mencionado anteriormente difiere estadísticamente de Villa Ángela, donde incluso el duramen y médula dentro del mismo sitio mantienen tonalidades significativamente distintas entre sí (Figura 25a). Las regiones estudiadas difieren estadísticamente entre secciones, dentro de una misma sección el duramen y médula no muestran diferencias estadísticas significativas (Figura 25b). Tanto la saturación (c) como el pigmento

amarillo (b^*) están correlacionados con el ángulo de tinta en la albura, en el duramen solo se correlacionó significativamente b^* con h^* (Tabla 4, ANEXO I).

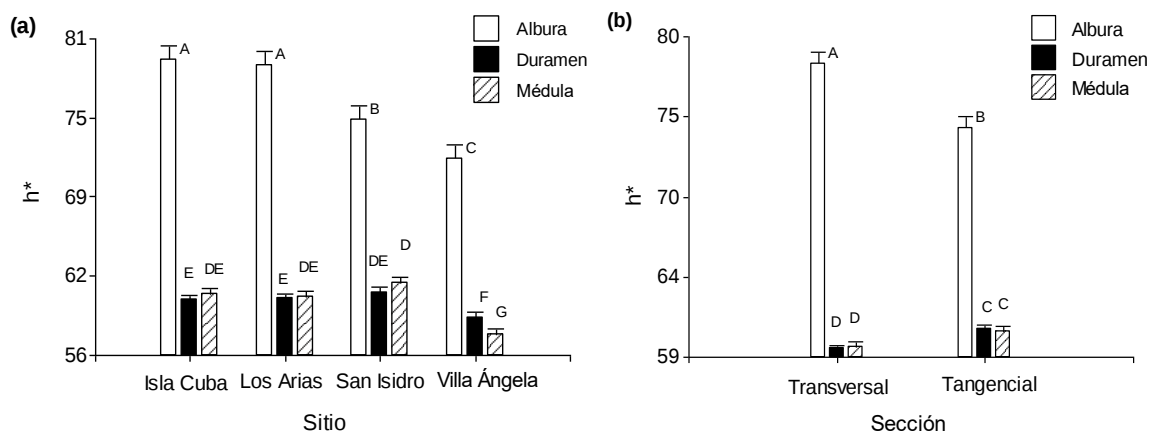


Figura 25 Medias ajustadas y errores estándares para la interacción *sitio x región* (a) y *sección x región* (b) del ángulo de tinta (h^*) mediante el test de Fisher ($\alpha=0,05$).

Fuente: Autor (2020)

Estudios similares llevados a cabo por Santos (2018), en especies comercializadas como “*Tauari*” (algunas especies de la familia Lecythidaceae), obtenidas de distintas procedencias muestran diferentes tonalidades en la madera en función del lugar de donde provienen. El ángulo de tinta obtenido en el presente estudio, se encuentra en el primer cuadrante, dentro del rango de colores de las maderas tropicales brasileñas, evaluadas por Camargos y Gonçalves (2001).

Camargos y Gonçalves (2001), propusieron 25 grupos de colores en maderas obtenidas a través de agrupamiento de clúster, para las variables cromáticas. De acuerdo a estos grupos, el color del duramen en *Prosopis alba* en los distintos sitios varió de rosa grisáceo en sitios de Santiago del Estero, donde la precipitación es menor (Los Arias San Isidro) a color oliva en Isla Cuba, Formosa y marrón claro en Villa Ángela, Chaco, (Figura 26), sitios de mayor precipitación.



Figura 26 Color en la superficie de madera según el sitio y la región del leño.
Fuente: Autor (2020)

4.3. Correlación entre parámetros colorimétricos

Entre el pigmento rojo (a^*) y el parámetro L^* , en la albura mostraron correlaciones negativas ($r = -0,73$) y significativa ($p < 0,0001$), ya que la claridad de las muestras (L^*) de made-

ra en la albura aumenta con la disminución en el contenido de pigmento rojo. En el duramen y médula (Figura 27a), esta correlación fue positiva ($r_{\text{duramen}} = 0,22$; $r_{\text{médula}} = 0,24$) pero no significativa ($p_{\text{duramen}} = 0,1419$; $p_{\text{médula}} = 0,0984$, respectivamente). Estas dos últimas regiones fueron las más oscuras (bajos valores de L^*), asociados al mayor contenido de pigmento rojo (a^*) y menor contenido de pigmento amarillo (b^*).

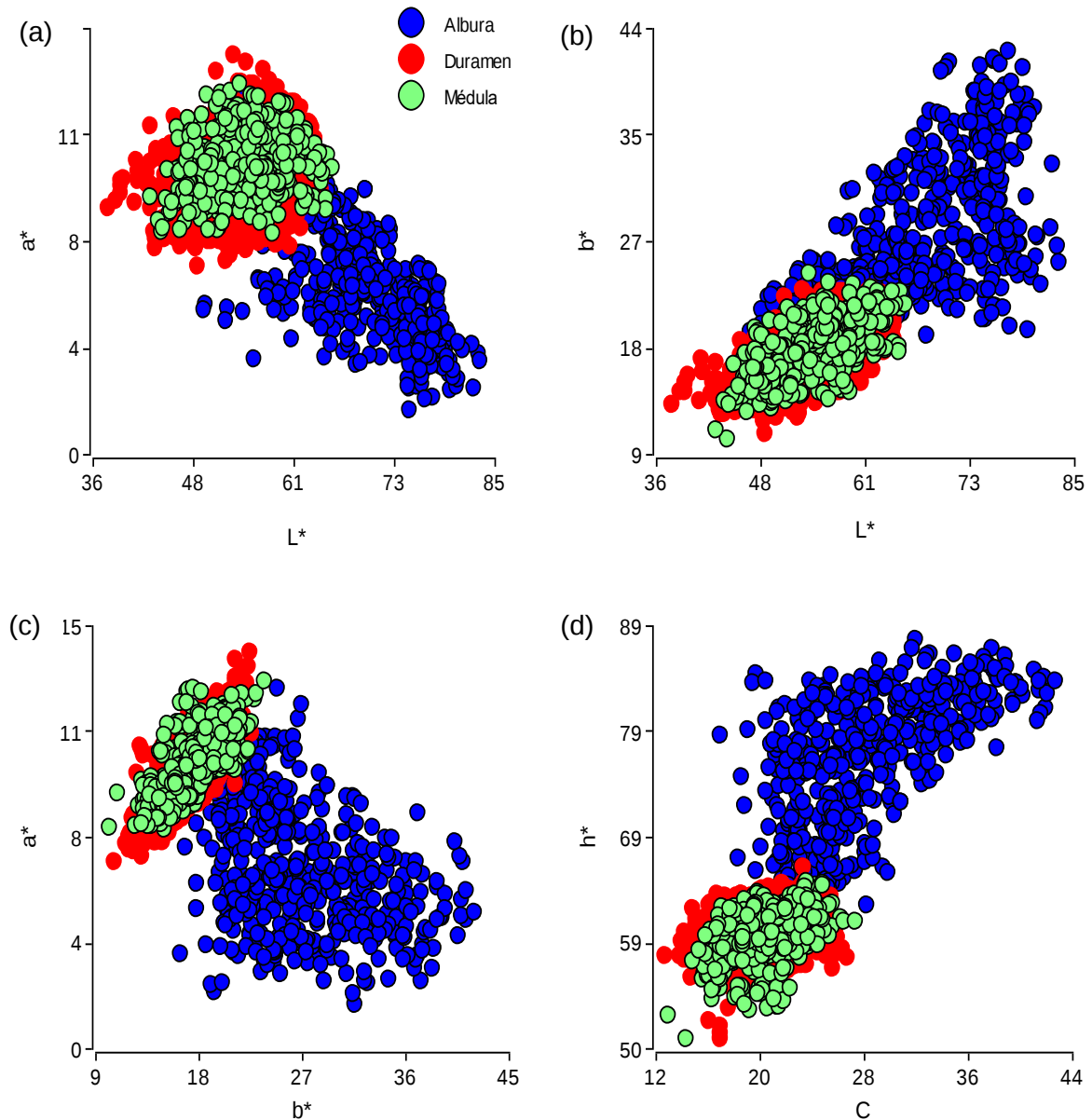


Figura 27 Diagrama de dispersión entre parámetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C , h^*) en las tres regiones de estudio. Fuente: Autor (2020)

Como se observa en la Figura 27b, en las tres regiones de estudio el pigmento amarillo (b^*) aumenta con el aumento de la claridad (L^*) de las muestras, desde la médula a la corteza, la claridad en la albura se encuentra muy por encima que en el duramen y médula. Existiendo una correlación significativa ($p < 0,0001$) entre estos parámetros para las tres regiones estudiadas.

Existe una correlación entre los parámetros a^* y b^* , tanto en la albura ($r = -0,55$; $p = 0,0001$) como en el duramen ($r = 0,81$; $p < 0,0001$) y médula ($r = 0,70$; $p < 0,0001$), (Figura 27c), se observa que en la albura aumentos en el pigmento amarillo (b^*), van acompañados de una disminución del pigmento rojo (a^*), mientras que en el duramen y médula esta relación es positiva.

Entre la saturación (C) y el ángulo de tinta (h^*), se aprecia una relación positiva y significativa en las tres regiones de estudio, posiblemente porque tanto la saturación como el ángulo de tinta se obtienen a partir de parámetros a^* y b^* .

Tendencias similares fueron observadas por Moya y Marín (2011) en clones de *Tectona grandis*, donde se determinó que existe una correlación significativa entre los parámetros L^* y a^* , L^* y b^* ambos en la albura. Sin embargo, en el duramen estos autores solo se encontraron una correlación significativa entre L^* y a^* , al igual que Moya y Berrocal (2010). Los estudios abordados por Bradbury *et al.* (2010), en acacia negra, también reportan que aumentos de la luminosidad se asocian a una disminución en el contenido de pigmento rojo. En *Fagus sylvatica*, Liu *et al.* (2005) encontraron que los parámetros del sistema de color CIELab estaban significativamente correlacionados (L^* con a^* , L^* con b^* y a^* con b^*), pero en algarrobo blanco las únicas correlaciones significativa en el duramen y médula fueron entre los parámetros b^* con a^* y L^* .

Sin embargo, el color de la madera de la albura no es un indicador que permita predecir el color del duramen porque no existen correlaciones entre los parámetros del color de estas regiones (Tabla 4, ANEXO I). Falta de correlación en el color albura- duramen también fue confirmado por Moya y Marín *et al.* (2011).

Esto muestra que la variación del color en la madera de *Prosopis alba* se produce por una variación lineal entre b^* y L^* e inversa entre a^* y L^* . Gierlinger *et al.*, (2004); mencionan por ejemplo que el pigmento rojo (a^*) y la luminosidad (L^*) se correlacionan con el contenido extractivo, mientras que el pigmento amarillo está relacionado principalmente con la fotoquímica de los principales componentes de la madera, especialmente la ligni-

na, por lo que la variación de los extractos o la composición química de la lignina producida a partir de diferentes propiedades del suelo puede explicar, en parte, la variación del color de la madera del duramen (Moya y Berrocal, 2010).

Este comportamiento también puede ser debido a la mayor presencia de extractivos y depósito de sustancias en el duramen. Estudios abordados por Giménez *et al.* (2001) en Algarrobo blanco, muestran que anatómicamente existe una oclusión parcial de los poros por gomas en un porcentaje del 10-30%, además es posible visualizar la presencia de cristales de oxalato de calcio y contenidos de gránulos de almidón, lo que puede también influir en la coloración del duramen. Por su parte Baar *et al.* (2014), ratifican que el color de la madera es resultante, básicamente, de la composición química de las sustancias presentes en el xilema, en particular, extractivos y lignina. Moya y Berrocal (2010) mencionan que cuanto más oscura (valores bajos para L^*) y más roja (valores positivos altos para a^*) es la madera, más alta es la resistencia a la descomposición.

Monteoliva *et al.* (2009) reportó en *Acacia melanoxylon* una relación inversa entre la luminosidad de la madera y la concentración de cromóforos, el cual aumenta con el proceso de duraminización. Menores valores de luminosidad, se asocian con mayor concentración de cromóforos, es decir, más oscura es la madera. Este comportamiento fue evidente en el duramen de *Acacia melanoxylon* donde la luminosidad descendió un 28% con respecto a la albura. En *Prosopis alba* esta diferencia de luminosidad solo descendió un 12,88% con respecto a la albura.

Giménez *et al.* (2000) sostienen que desde el punto de vista fisiológico, la duraminización avanza con la edad y el diámetro. Esto puede deberse, al equilibrio que se establece con la cantidad óptima de albura que necesita el árbol, es decir, que la formación del duramen actúa como una forma de regulación de la cantidad de albura (Monteoliva *et al.* 2009). Giménez *et al.* (2000) mencionan que en varias especies de la Región Chaqueña donde la albura y el duramen se diferencian, el fenómeno principal que caracteriza la transición entre estas dos regiones es la pérdida de la conductividad de los elementos vasculares y la muerte de las células vivas y su obstrucción con taninos, gomas, tilosis, lo que contribuye a aumentar la durabilidad en el leño.

4.4. Variación del color de la madera

4.4.1 Variación del color de la madera dentro del árbol

Las diferencias dentro del árbol entre el color del duramen y la albura (ΔE) variaron ampliamente de 4,31 a 32,90 con una media de 17,16 (Tabla 5), estas variaciones dentro de un mismo árbol se produjeron sobre todo por aumentos en la claridad (L^*) y pigmento amarillo (b^*) y disminución del parámetro a^* en las muestras de la albura respecto al duramen y médula, estas diferencias del color encontradas, son de apreciable a muy apreciables, para el ojo humano.

Tabla 5. Variación del color (ΔE) y variación de parámetros colorimétricos (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) entre albura y duramen.

Par	Diferencia de color			
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE
Albura x Duramen	12,87 (55,64)	-3,68*(57,27)	9,55 (52,04)	17,16(43,64)
	[-3,58; 28,24]	[-8,03; 1,71]	[0,88-21,72]	[4,31; 32,9]

Nota: Los valores mínimo y máximo se muestran entre corchetes y el coeficiente de variación entre paréntesis.

Amplias variaciones del color (ΔE) dentro del árbol entre el duramen y la albura también fueron reportados Bradbury *et al.* (2010) en *Acacia melanoxylon* con valores promedios entre 1,5 a 33,6, con una media de 21,4. Por su parte, Moya y Calvo-Alvarado (2012) registraron valores promedios de 15,3 en la variación del color en *Tectona grandis* en Costa Rica. Estas grandes diferencias de color dentro de un mismo árbol puede resultar un problema a la hora de comercializar un producto elaborado de madera, sobre todo si los usuarios finales tienen ciertas preferencias por la uniformidad de los productos que adquieren.

Sin embargo, en empresas como *Franco Forniture*, Málaga, España (Franco Forniture 2019) dedicadas a la elaboración de muebles de diseño y decoraciones, utilizan estas grandes variaciones entre albura y duramen de otras especies (Ej: *Juglans sp*) para realizar mesas de comedor, las cuales son diseñadas en una sola pieza de madera maciza que atraviesa el fuste tangencialmente conservando albura y duramen, por lo que estos contrastes o grandes variaciones en estas dos regiones se visualizan en una misma pieza de madera (Figura 28). Por otro lado, Bradbury *et al.* (2010) afirman que en acacia negra la albura de esta especie se usa generalmente en paneles de pared en grado "Black & White" (Tasmanian Timber Promotion Board, 2006), donde el contraste entre el

duramen oscuro y la albura clara crea un efecto visual dramático, al igual que en *Acacia*, *Prosopis alba* se podría emplear en la fabricación de pisos de parquet, mesadas de cocinas, revestimientos, mesas y mueblería en general, creando el mismo efecto visual. Sin embargo, muchas veces el uso de la albura siempre fue cuestionado por su baja durabilidad natural (Instituto Nacional de Tecnología Industrial 2018, Normas IRAM 9544, Giménez *et al*, 2000).



Figura 28 Contrastes entre albura y duramen en mesa fabricada en nogal, originarios de Indonesia.
Fuente: Franco Furniture (2019)

La colorimetría podría emplearse para determinar un estándar mínimo para ΔE entre albura y duramen a fin de crear una medida objetiva con el grado de color “Black & White”.

Como se observa en la tabla 6, la mayor variación del color (ΔE^*) entre albura y duramen se produce en sección transversal, ya que la misma es un 30,1% superior que la sección lateral (Figura 29), siendo ΔL^* y Δb^* las variables que mayor incidencia tienen en esa variación. Lateralmente las diferencias entre duramen y albura son menores, esto puede ser favorable en ciertos casos donde se tiene preferencias por la uniformidad de color, ya sea para la elaboración de deck o muebles, sin embargo estas diferencias siguen siendo muy apreciables de acuerdo a la tabla elaborada por Hikita *et al.* (2001).

Tabla 6. Variación del color (ΔE) y de parámetros colorimétricos (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) entre albura y duramen discriminado por sección.

Par	Sección	Diferencia de color			
		ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
Albura x Duramen	Lateral	9,53	-2,88	8,53	14,12
		[-3,58; 21,21]	[-6,57; 1,71]	[0,88; 20,65]	[4,31; 26,9]
	Transversal	16,22	-4,47	10,57	20,19
		[3,95; 28,24]	[-8,03; -0,32]	[4,05; 21,72]	[7,17; 32,9]



Figura 29 Variación del color dentro del árbol, en muestra de Los Arias, Santiago del Estero.
Fuente: Autor (2020)

En la Tabla 7, se aprecia que las variaciones del color entre albura y duramen para los distintos sitios analizados fueron en promedio entre 11,66 en Villa Ángela, Chaco y 21,63 en Isla Cuba Formosa, siendo los valores más bajos y altos respectivamente (Figura 30), esto resultó de las diferencias que existen en los parámetros de luminosidad (L^*), pigmento amarillo (b^*) y rojo (a^*). El mayor contraste entre albura y duramen fue en Formosa, donde el duramen es mucho más oscuro que los demás sitios. La variación del color de acuerdo a las secciones analizada, en Isla Cuba prácticamente mantienen los mismos niveles de variación. Sin embargo en los restantes rodales y la plantación se aprecia que la variación entre albura y duramen es 33,30 a 43,57% superior en sección transversal en relación a la sección lateral. Moya y Calvo-Alvarado (2012) encontraron para *Tectona grandis* que crecen en distintos sitios, diferencias de color entre albura y duramen de 13,6 y 15,3, rango de variación menor en relación al observado en la presente tesis.

Tabla 7. Variación del color (ΔE) y de los parámetros del color (ΔL^* , Δa^* , Δb^*) entre los sitios muestreados.

Par	Sitio	Sección	Diferencias de parámetros		
			ΔL^*	Δa^*	Δb^*
Albura x Duramen	Isla Cuba	Lateral	15,71	-3,48	13,50
		Transversal	17,53	-4,97	11,50
		Promedio	16,62	-4,23	12,50
	Los Arias	Lateral	9,50	-3,72	9,55
		Transversal	19,55	-6,05	13,85
		Promedio	14,53	-4,89	11,70
	Plantación (San Isidro)	Lateral	9,02	-1,92	5,57
		Transversal	17,07	-4,31	8,86
		Promedio	13,04	-3,11	7,21
	Villa Ángela	Lateral	3,88	-2,41	5,52
		Transversal	10,74	-2,56	8,07
		Promedio	7,31	-2,48	6,80

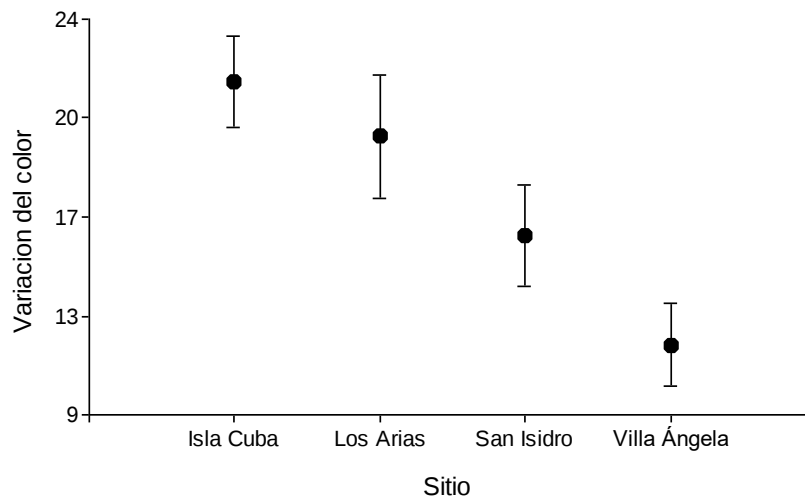


Figura 30 Variación del color (ΔE^*) entre albura y duramen discriminado por sitios.
Fuente: Autor (2020)

4.4.2. Variación del color de la madera entre rodales nativos y plantación

La variación total de la coloración (ΔE^*), determinada por la Ecuación 3, que se muestra en la metodología, tiene en cuenta las diferencias de las coordenadas cromáticas (a^* y b^*) y de luminosidad (L^*), proporcionando así una visión más amplia del desempeño de las muestras de madera de plantación sobre la apariencia de las muestras de rodales naturales.

En la Tabla 8 se describen las variaciones de los parámetros colorimétricos según la región de la muestra. Se observa que el cambio de color en maderas provenientes de rodales nativos respecto a las de plantación ocurrió sobre todo en la albura ($\Delta E^* = 12,15$), seguido de la médula ($\Delta E^* = 6,35$). Esta variación en la tonalidad de la albura se debe a un leve aumento de las coordenadas b^* ($\Delta b^* = 2,79$) y disminución de la luminosidad ΔL^* ($-3,26$), mientras que en la médula hubo una disminución en todos los parámetros colorimétricos especialmente en L^* y b^* , con $-3,89$ y $-1,68$ respectivamente, esta variación fue clasificada como muy apreciable en las tres regiones de acuerdo con los criterios de la Tabla 1, elaborada por Hikita *et al.* (2001). Asimismo las variaciones en la coloración en el duramen también fueron clasificadas como muy apreciable, el parámetro que mayor contribución tuvo en esta variación fue la luminosidad.

Tabla 8. Variaciones de los parámetros colorimétricos y del color de las muestras de la madera de *Prosopis alba* de rodal natural respecto a la plantación

	Región	n	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE	Clasificación
Nativo x Plantación	Albura	360	-3,26	-0,50	2,79	12,15	Muy apreciable
	Duramen	1440	-3,04	0,25	-0,32	6,11	Muy apreciable
	Médula	360	-3,89	-0,16	-1,68	6,35	Muy apreciable

Como se observa en la tabla 8, los valores negativos de ΔL^* , existe un oscurecimiento las superficies de las muestras de madera de todos los rodales naturales, respecto a la madera de plantación. En cuanto a Δa^* tuvo variaciones muy pequeñas, prácticamente nulas. Las variaciones del parámetro b^* (Δb^*) en la albura de rodales nativos fueron superiores que la plantación, mientras que en el duramen y médula, los niveles b^* en la plantación supera a bosques nativos. Mazet y Janin (1990), informaron que las muestras de chapa de roble evaluadas por 90 asesores franceses e italianos de industrias de carpintería consideran que una diferencia de más de dos unidades en el valor de ΔE es distinguible al ojo humano. Para aplicaciones con tratamiento térmico en madera de *Eucalyptus*, estas diferencias variaron de 9,77 a 33,74 para temperaturas de secado entre 140°C a 180°C respecto al color natural sin tratamiento (Griebeler, 2013). Esto nos indica que una diferencia en dos puntos en diferentes muestras de *Prosopis alba* en todas las coordenadas de los sistemas de color producirá una diferencia distinguible para el ojo humano.

Arce y Moya (2015), evaluaron el cambio de color en el duramen de 20 clones *Tectona grandis* a los 15 años de edad respecto a la madera que crece en un bosque natural y encontraron que esas variaciones eran muy visibles para todos los clones analizados. En este caso ΔE varió entre 8 y 16, en comparación con la madera de los árboles que crecen en ambientes naturales, este último dato es similar a los valores encontrados para el duramen y médula del presente estudio. Por su parte Moya y Marín (2011) en estudios previos también realizados en *Tectona grandis* a los 10 años de edad encontraron variaciones de color entre 15,97 y 23,39. Esto indica que visualmente la madera más oscura, probablemente la más atractiva para el usuario final, se encuentra en rodales nativos. Por lo que estos valores de ΔE , nos indican que a pesar de ser una madera oscura la de plantación, se deberían estudiar las preferencias del mercado.

Sin embargo Arce y Moya (2015) en *Tectona grandis* determinaron que clones de la edad de 15 años son mucho más oscuros que a los 11 años, por lo que madera de estas edades podría ser comercializable y deseable para diferentes usos de productos. Sin bien esto es aplicable únicamente para madera de teca. En el presente estudio, por tener la

plantación de *Prosopis alba* la edad de 21 años en el momento de obtener las muestras, podrían considerarse desde el punto de vista colorimétrico como válida para ser comercializada a esta edad.

En la tabla 9, es posible visualizar que tanto para sección lateral como transversal los cambios de color (ΔE) en algunas secciones y regiones estuvieron muy por encima de la tabla elaborada por Hikita *et al* (2001). Se observa que para la sección transversal del duramen y médula esa variación fue un 14,97 y 12,51% mayor respecto a la sección lateral respectivamente. Mientras que la variación del color en la albura entre secciones mantuvo similares niveles.

Tabla 9. Variaciones entre los parámetros colorimétricos de las muestras de la madera de *Prosopis alba* de rodal natural respecto a la plantación según la sección de estudio.

Par	Región	Sección	n	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE	Clasificación
Nativo x Plantación	Albura	Lateral	180	-1,76	-0,86	3,85	12,22	Muy Apreciable
		Transversal	180	-4,76	-0,15	1,74	12,08	Muy Apreciable
	Duramen	Lateral	720	-2,44	0,42	-0,11	5,62	Apreciable
		Transversal	720	-3,63	0,07	-0,54	6,61	Muy Apreciable
	Médula	Lateral	180	-3,16	-0,06	-1,50	5,82	Apreciable
		Transversal	180	-4,63	-0,25	-1,86	6,87	Muy Apreciable

Tanto ΔL^* , Δa^* y Δb^* , para las tres regiones en las secciones lateral y transversal tuvieron el mismo comportamiento que el reportado en la Tabla 8, es decir hubo un oscurecimiento de las muestras de rodales nativos respecto a la madera de plantación en ambas secciones (Tabla 9), siendo más acentuada esa disminución en la sección transversal. Esto también fue observado entre las secciones por Nishino *et al.* (2000) en 26 especies de madera dura y Atayde *et al.* (2011) en *Brosimum* sp.

Solo unos pocos autores han usado la distancia de los valores medios de CIELab para definir el rango de color de una especie. Beckwith (1979) encontró, en muestras maderas aserradas, que las superficies transversales diferían significativamente de las superficies longitudinales. Estudios más recientes efectuados por Vanclay *et al.* (2008) también emplearon la medida estándar de la diferencia de color de CIE, $\Delta E = \sqrt{(L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}}$, para evaluar muestras de duramen "típica" de *Eucalyptus dunnii*, encontrando un ΔE medio de 8,4 a partir de superficies radiales secas aserradas.

En el presente estudio, las variaciones para todas las secciones y regiones son de apreciables a muy apreciables para el ojo humano de acuerdo a la clasificación de Hikita (2001), siendo en la albura mayores que en el duramen y la médula. Sin embargo, en

estas dos últimas regiones las diferencias de color entre rodal nativo y plantación son elevadas, siendo la madera de plantación más clara y amarillentas. Esto se explica, en parte, por los niveles de reflectancias alcanzados por la plantación (Figura 31), los cuales se encuentran por encima de los rodales nativos en ambas secciones lateral y transversal respectivamente. Cambios muy apreciables en el color también fueron reportados por Moya y Marín (2011) en clones de *Tectona grandis* (teca) a los 10 años, con variaciones muy altas del color (ΔE^*), valores entre 15,97 y 23,39, lo que sugiere que cuanto más joven es la plantación la diferencia de color es mayor respecto a árboles de bosques nativos. Voss y Hale (1998) han establecido que el ojo humano puede percibir una diferencia de color (ΔE^*) mayor que 2.

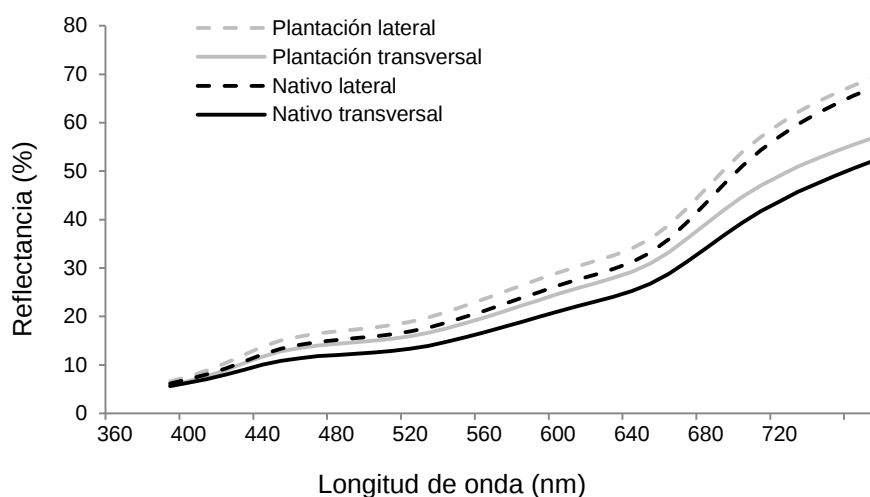


Figura 31 Niveles de reflectancias en función de la longitud de onda de rodales nativos y plantación en las dos regiones de estudio.
Fuente: Autor (2020)

4.4.3. Variación del color de la madera entre sitios

En la Tabla 10, es posible visualizar que el duramen y médula del sitio más árido (Los Árias) tuvo un oscurecimiento (ΔL^*) menor respecto a la plantación, mientras que en los sitio de mayor precipitación (Villa Ángela e Isla Cuba) el oscurecimiento de las muestras fue mucho mayor. En la albura, Villa Ángela presentó el mayor oscurecimiento con valores de -8,78 (Figura 32a) en relación a la albura de la plantación, mientras que en Isla Cuba y Los Arias, la diferencias en este parámetro fueron pequeñas. Estas variaciones en la claridad pueden ser explicadas, en parte, por la reflectancias de las muestras, ya que las muestras de la plantación tuvieron la mayor reflectancia en el duramen y médula, seguido de Los Arias, mientras que sitios con mayor precipitación (Isla cuba y Villa Ángela) los niveles reflectancia fueron más bajos (Figura 33).

Tabla 10. Variaciones entre los parámetros colorimétricos en muestras de rodales naturales respecto a muestras de plantación discriminado por sitio

Región	Sitio	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE	Clasificación
Albura	Isla Cuba	-0,87	-1,48	4,18	11,89	Muy Apreciable
	Los Arias	-0,14	-1,05	5,39	12,27	Muy Apreciable
	Villa Ángela	-8,78	1,01	-1,18	12,30	Muy Apreciable
Duramen	Isla Cuba	-4,44	-0,37	-1,11	6,80	Muy Apreciable
	Los Arias	-1,62	0,73	0,90	5,57	Apreciable
	Villa Ángela	-3,04	0,38	-0,76	5,97	Apreciable
Médula	Isla Cuba	-5,06	-0,58	-1,69	6,72	Muy Apreciable
	Los Arias	-2,56	0,02	-0,71	5,11	Apreciable
	Villa Ángela	-4,06	0,10	-2,64	7,21	Muy Apreciable

Las variaciones del parámetro a^* fueron mínimas en el duramen y médula, en la albura el contenido de pigmento rojo en Isla Cuba y Los Arias fue en promedio menor que el observado en la plantación, en Villa Ángela el comportamiento fue opuesto (Tabla 10). Respecto al parámetro b^* , el duramen y médula en los distintos sitios mantuvieron similares niveles de variación, siendo en todos los casos negativos, es decir, en las muestras de plantación predomina el pigmento amarillo en relación a las muestras de rodales naturales, excepto el duramen de Los Árias, donde las muestras nativas fueron levemente más amarillentas que las de plantación ($\Delta b^*=0,90$).

Sotelo Montes *et al.* (2013), en estudios de variación del color de madera en poblaciones naturales de Mali, encontraron que las variables colorimétricas diferían significativamente entre las regiones, por ejemplo para *Ziziphus mauritiana* Lam. la madera era más oscura y más azul en ubicaciones más húmedas, similar al comportamiento observado en el presente trabajo. Esto también fue observado por Villegas y Área (2009), quienes encontraron que madera de *Salix* en sitios más protegidos de inundaciones, presentron maderas más blancas y luminosas que sitios sometidos a frecuentes inundaciones. Estas diferencias del parámetro L^* tienen gran aplicabilidad, sobre todo en la industria del mueble, ya que permitirán discriminar que tan distantes o cercanos son los colores de sitios y/o ambientes distintos, y de esta forma y dependiendo de las preferencias del mercado fomentar la producción de madera en sitios que tienden a producir maderas más claras u oscuras. Además Sotelo Montes *et al.* (2013), sugiere que el ambiente "regional" afecta el color de la madera más que el ambiente "local" (es decir, el suelo, el terreno y los tipos de uso de la tierra).

Todas las variaciones de los distintos parámetros colorimétricos entre los rodales nativos y la plantación generaron, en la albura, variaciones del color para todos los sitios muy apreciable para el ojo humano, mientras que en el duramen y médula fueron de aprecia-

bles a muy apreciables. Estas variaciones en el color fueron ocasionadas sobre todo por variaciones ocurridas en la luminosidad y el pigmento amarillo (Figura 32 a y c). Es de destacar que la variación del color en la albura fue mucho más acentuada que en el duramen y médula donde estas dos últimas tuvieron un comportamiento similar (Figura 32 d).

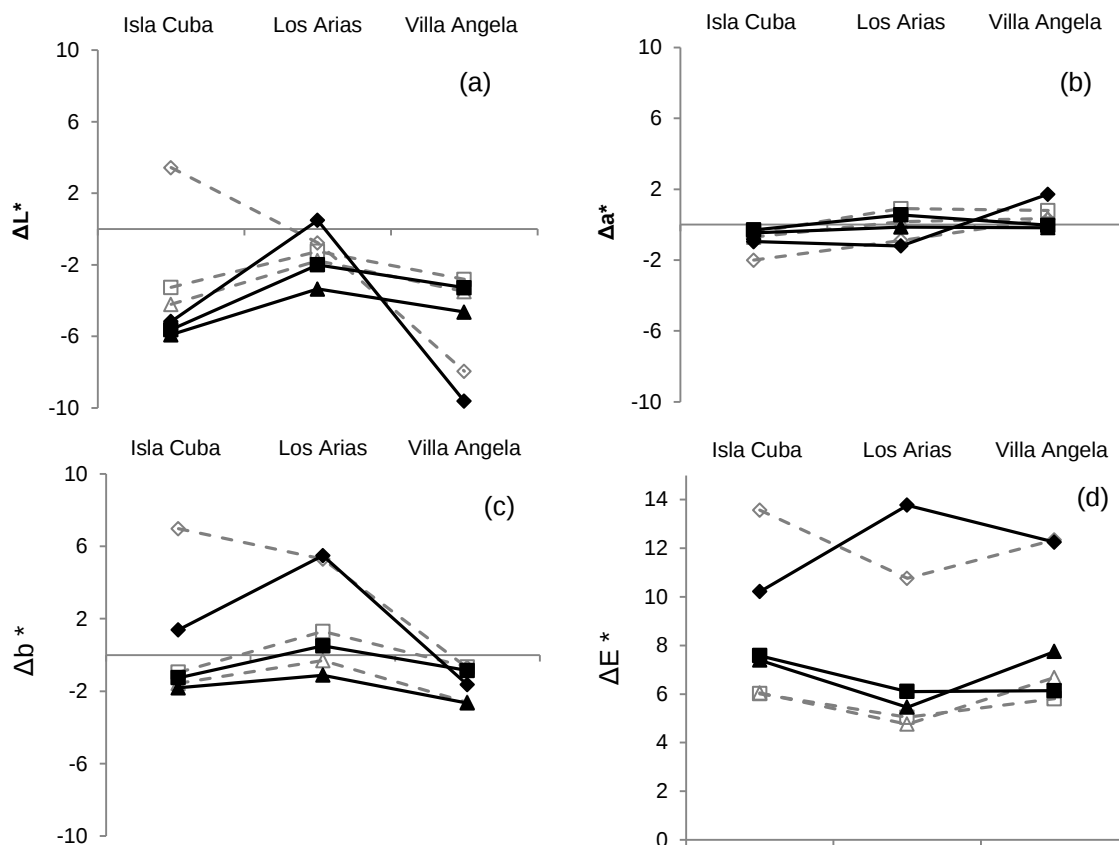


Figura 32 Curvas de variación de luminosidad L^* (a), pigmento rojo a^* (b), pigmento amarillo b^* (c) y variación del color (d) en *Prosopis alba*, según el sitio y la sección (lateral: líneas grises, transversal: líneas negras). Rombos: albura, cuadrados: duramen; triángulo: médula.

Fuente: Autor (2020)

En la Figura 33 se pueden visualizar las curvas de reflectancia en los distintos sitios según la región de madera analizada. En la albura se aprecia que el sitio de Villa Ángela presenta menor reflectancia (entre 5,8 a 57,32%), respecto a los demás sitios (5 a 72%), siendo más acentuadas esas diferencias a partir de los 460 nm, este es el motivo por el cual la albura de este sitio fue la más oscura (Figura 33 a).

En el duramen y médula (33 b y 33 c), las curvas de reflectancia en las distintas longitudes de onda fueron bastante cercanas entre sitios, siendo levemente superiores en San Isidro (plantación) e inferiores en Isla Cuba, Formosa. Para todas las regiones, se apre-

cia, que la reflectancia aumenta conforme aumentan las longitudes de onda, recordando que la curva espectral es la "firma" del color de cada situación estudiada.

Las diferencias colorimétricas entre sitios y regiones en trozas de madera, permite al industrial o fabricante hacer una selección de la materia prima por sitio de procedencia y región de la troza, con el fin de obtener materiales más homogéneos en cuanto a su color. De esta forma, durante el tableado pueden obtenerse piezas más claras o más oscuras, de acuerdo con las predilecciones de mercado.

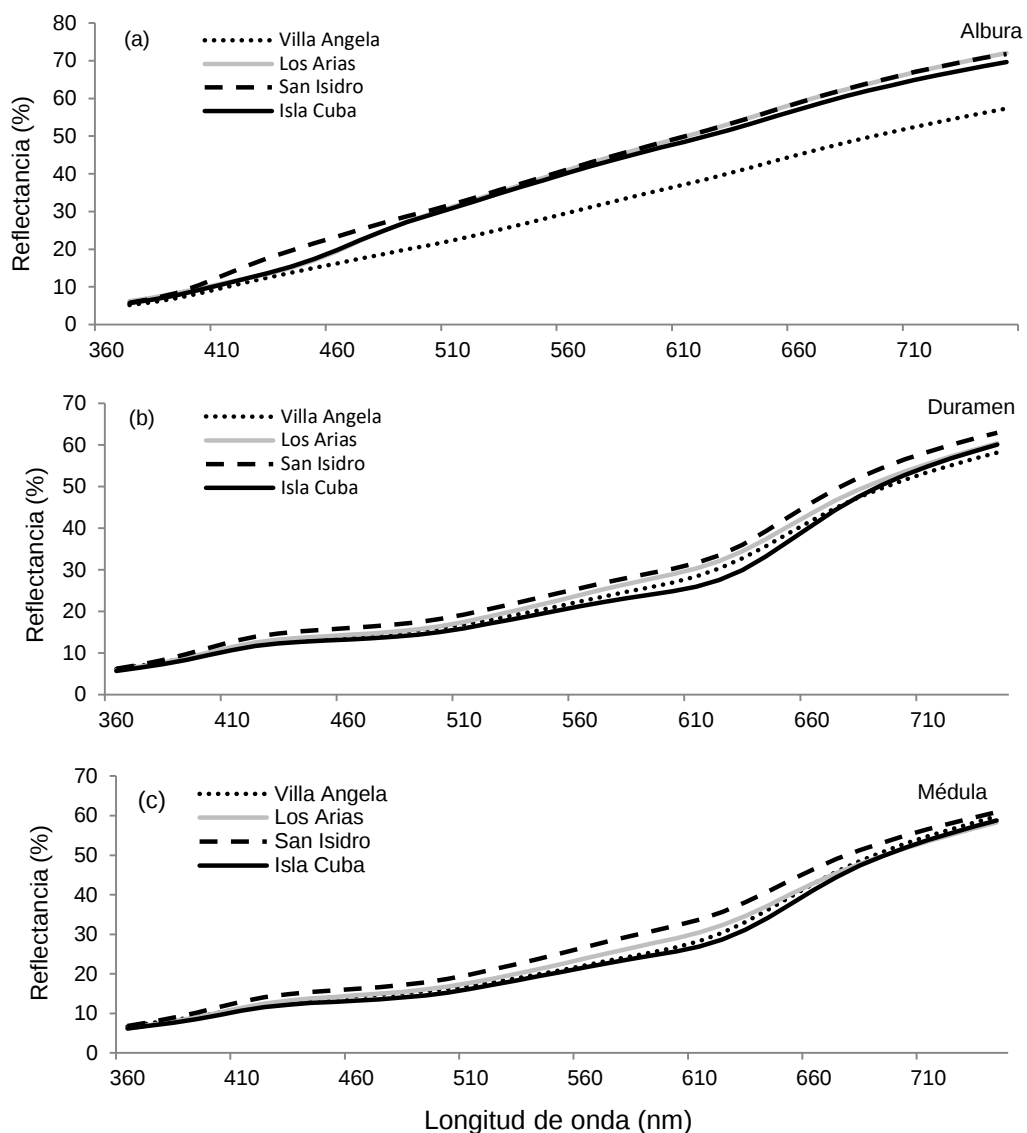


Figura 33 Curvas de reflectancia en las distintas regiones de la muestra de madera (albura, duramen y médula) para los distintos sitios de estudio.

Fuente: Autor (2020)

4.5. Densidad de la madera: entre sitios y dentro del árbol

El valor promedio de densidad básica de la madera (DBm) de los 24 árboles analizados fue de 0,60 g/cm³, con un rango de variación entre 0,5-0,76 g/cm³. La densidad promedio discriminado por sitio se puede observar en la Tabla 11. La densidad media estuvo dentro del rango de valores observados por Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2003), Galera (2000), Pometti *et al.* (2009) para esta especie. Sin embargo, Tortorelli (2009) reportó densidades superiores entre 0,75-0.85 g/cm³, posiblemente por tratarse de individuos con mayor edad. Conforme a la categorización de la IAWA (Wheeler *et al.*, 1989), la madera de algarrobo blanco se clasificó como de densidad media en este estudio.

Tabla 11. Medidas de resumen para densidad básica por sitio

Sitio	Provincia	n	Media	CV	Mín	Máx
Isla Cuba	Formosa	20	0,65	6,97	0,56	0,76
Los Arias	Sgo del Estero	22	0,61	6,84	0,52	0,71
Villa Ángela	Chaco	20	0,58	7,47	0,52	0,70
San Isidro	Sgo del Estero (Plantación)	20	0,57	6,50	0,50	0,63

Dónde: n= número de muestras; CV= coeficiente de variación; Min= mínimo; Max= máximo.

Como la densidad está directa y positivamente relacionada con la compresión paralela a las fibras, resistencia al corte, dureza, flexión (Pometti *et al.* 2009, Igartúa *et al.* 2015), se espera que aumentos en las densidades básicas generen aumentos de las propiedades mencionadas anteriormente. En este contexto, el sitio de Isla Cuba tendría ventajas respecto a los demás rodales y la plantación.

Si bien las muestras tomadas de plantaciones son de un solo sitio y con un distanciamiento amplio (5 x 8 m), es objeto de estudios futuros en esta especie, la respuesta de la DBm a distintos distanciamientos, existen hipótesis que plantean que a mayores distanciamientos, el crecimiento radial es mayor y por ende la densidad básica disminuye (Winck, 2013)

El mejor modelo ajustado para densidad básica (BIC= -145,91, AIC= -191,89) fue un modelo heterocedástico con varianzas heterogéneas para sitio, donde la interacción *sitio x distancia* evidencian diferencias estadísticamente significativas ($p= 0,01$), a un 95% de confianza (Tabla 5, ANEXO I). Como se observa en la Figura 34, las distancias B, C y D del sitio de Isla Cuba presentaron las mayores densidades de madera (sitio con la temperatura media más elevadas), las cuales difieren estadísticamente del resto de los sitios y

distancias. La varianza aleatoria correspondiente al árbol resultó muy destacada dado que representó el 75% de la varianza aleatoria total.

Moglia y López (2001) en *Aspidosperma quebracho blanco*, encontraron que la densidad del leño no se encontraba afectada por el sitio, y la mayor variabilidad fue explicada por las diferencias entre árboles con un 82,1%, que por las distancias a la médula que representaron un 17,9%. Sin embargo, Igartúa y Monteoliva (2010) en *Eucalyptus globulus* encontraron que existen diferencias significativas entre las procedencias, alturas de muestreo y la interacción de *procedencias x altura* de muestreo, siendo la varianza aleatoria debida al árbol destacada con un 62% respecto a la varianza total aleatoria, similar al presente estudio.

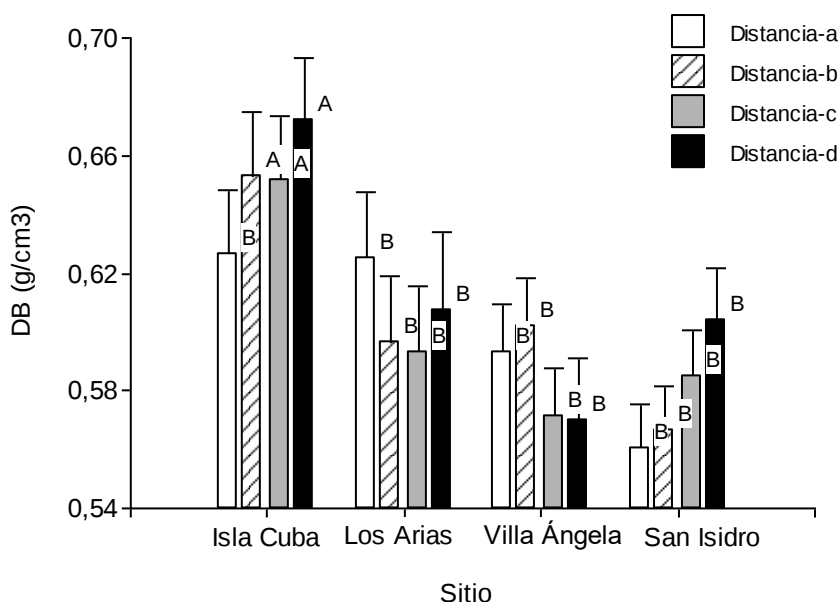


Figura 34 Densidad del leño discriminado por sitio y distancias a la médula.
Fuente: Autor (2020)

Los valores medios más bajos de densidad básica fueron en la plantación (San Isidro), Santiago del Estero y el sitio más húmedo, Villa Ángela, con una densidad básica promedio de 0,57 y 0,58 g/cm³ respectivamente. Bradbury (2007) en otras leguminosas también reportaron menor densidad en plantaciones respecto a ambientes naturales. Esto puede deberse, en parte, al distanciamiento de la plantación, la edad, ya que en estudios efectuados por McDonald y Hubert (2002), Winck (2013) sostienen que los árboles con espaciamientos amplios tienden a poseer, entre otras características, menor densidad media, en relación a árboles que crecen con más competencia donde la densidad es mayor. Si bien en esta tesis no se evaluaron distintos distanciamientos, estudios previos efectuados

por Pometti *et al.* (2009) en plantaciones de *Prosopis alba*, en Santiago del Estero, encontraron densidades de madera levemente superiores ($0,61 \text{ g/cm}^3$) a las registradas en este trabajo, más cercanas a la densidad de rodal nativo de Los Arias. En este contexto, podríamos decir que la densidad del leño no es afectada por el sitio, pero sí hubo diferencia entre árboles, originados principalmente por la edad (distancias a la médula)

Es conocida la influencia de la edad en las propiedades de la madera: a mayor edad (mayores distancias desde la médula) la densidad media aumenta. Ferreira y Kageyama (1994) encontraron en *Eucalyptus grandis* que el efecto de la edad (asimilable a distancias) es más importante que el efecto de los sitios en la variación de la densidad básica. Esto fue corroborado por Moya y Marín (2011) en *Tectona grandis*. Sin embargo, en otras latifolias como *Eucalyptus grandis* (Winck *et al.*, 2014) y *Salix* (Holt y Murphey 1978) registraron independencia de estas variables. En este estudio, existe una tendencia de aumentar la densidad básica a mayores distancias desde la médula, es decir, que árboles de mayor edad tendrían mayores densidades (Figura 35). Sin embargo, las correlaciones entre la edad y la densidad básica no resultaron significativas pero sí positivas. Tendencias radiales similares fueron reportadas por Igarúa *et al* (2009) entre densidad normal y las distancias desde la médula a la corteza en *Acacia melanoxylon*.

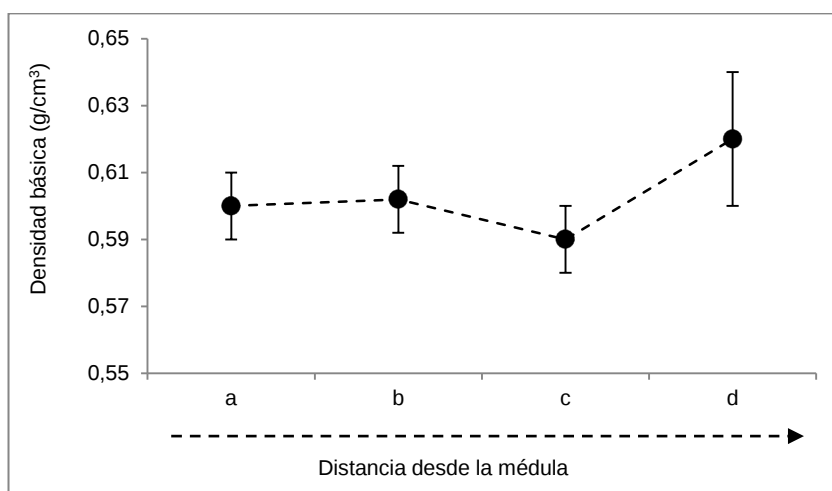


Figura 35 Densidad básica en función de las distancias a la médula.
Fuente: Autor (2020)

La densidad y parámetros relacionados a las condiciones de sitio, mostraron ciertas tendencias. La densidad de la madera con la precipitación media anual por sitio, se ajustó a una función polinómica de segundo grado con un $R^2=0,84$, la correlación entre estas dos variables fue negativa $r= -0,23$ (Figura 36a). Sin embargo, la densidad básica mostró incrementos con aumentos de la temperatura media de crecimiento en los distintos sitios

($r = 0,83$) (Figura 36 b). Con disminuciones en la evapotranspiración potencial la densidad tendió a disminuir en rodales nativos (Figura 36c). Estudios similares, efectuados por Thomas *et al.* (2004) en *Eucalyptus camaldulensis* confirmaron que la densidad de la madera aumenta plásticamente con la temperatura media de crecimiento, esta correlación también fue corroborada por Swenson y Enquist (2007) quienes evaluaron, la variación geográfica y filogenética de la densidad de la madera tanto para gimnospermas como para angiospermas en 4600 taxones. Por su parte, Sotelo Montes y Weber (2009) en un ensayo de procedencia/progenie de *Prosopis africana* en Nigeria, encontraron que las procedencias de las partes más secas de la región tenían madera más densa que las provenientes de las partes más húmedas de la región, estas tendencias coinciden con el comportamiento observado en *Prosopis alba* en los distintos rodales nativos.

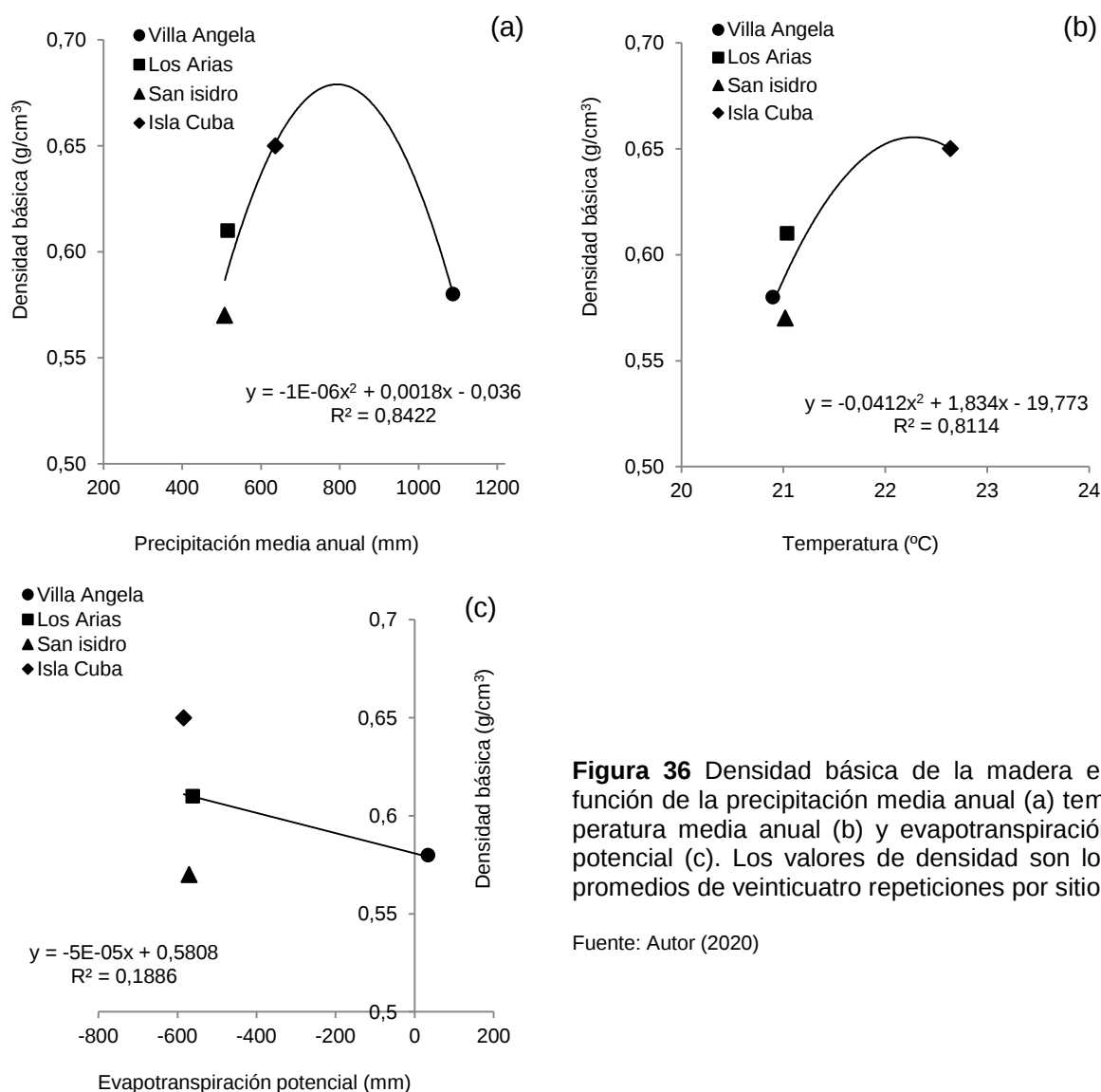


Figura 36 Densidad básica de la madera en función de la precipitación media anual (a) temperatura media anual (b) y evapotranspiración potencial (c). Los valores de densidad son los promedios de veinticuatro repeticiones por sitio.

Fuente: Autor (2020)

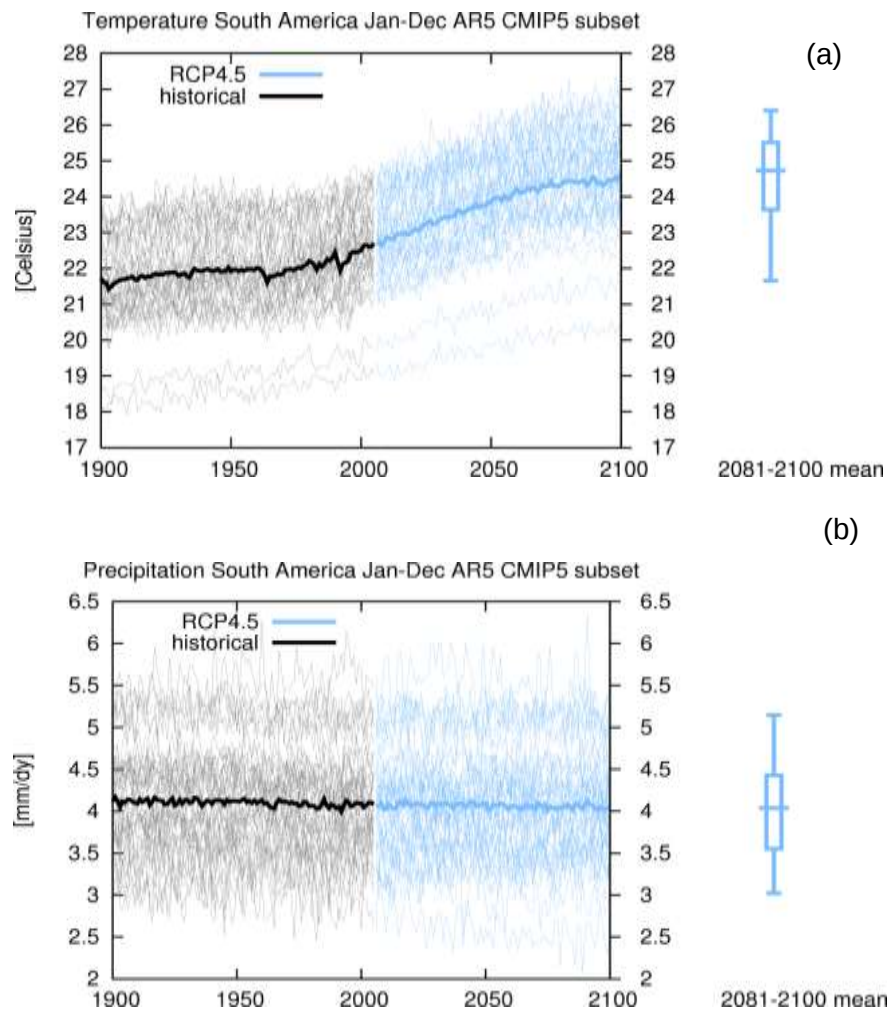


Figura 37 Atlas de cambio climático: temperatura **(a)** y precipitación **(b)**.

Fuente: Climate explorer (2019)

Martínez-Cabrera *et al.* (2009) basados en un estudio de 61 especies de arbustos determinaron que la densidad de la madera se correlacionó más significativamente con la precipitación y la aridez que con la temperatura. Por su parte Alarcón *et al.*, (2016) en estudios de microdensidad en progenies de *Eucalyptus viminalis*, que crecieron en dos sitios distintos sugieren que la densidad de la madera aumenta significativamente en sitios con mayor estrés (mayor aridez), similar a lo observado en el presente trabajo. En gimnospermas esto también fue confirmado ampliamente por Martínez Meier *et al.* (2008) quienes encontraron variación en densidad de madera de *Pseudotsuga menziesii* entre individuos y en respuesta al ambiente, siendo sobrevivientes a estrés aquellos individuos de

mayor densidad. Por su parte, Corcuera *et al* (2011), reportaron que la densidad de madera no presentó plasticidad con respecto al sitio en *Pinus pinaster*.

Por otro lado, valores de densidades están íntimamente relacionados con aspectos fisiológicos ya que Hacke *et al.* (2001) verificaron que las especies con mayor densidad de madera son más capaces de resistir el embolismo inducido por la sequía tanto en gimnosperma como en angiosperma. Esto también fue reportado por Jacobsen *et al.* (2006) quienes mencionan que las especies que experimentaron mayor estrés hídrico estacional tuvieron mayor densidad de xilema y mayor resistencia mecánica del tallo (MOR).

En la presente tesis, la cantidad de sitios muestreados no es elevada, sin embargo estos resultados sugieren una clara tendencia de respuesta de la densidad de la madera con la temperatura promedio de los sitios analizados, sobre todo en rodales nativos. Por lo tanto, la densidad de madera en *Prosopis alba* es un carácter que podría mostrar un cierto grado de plasticidad fenotípica en respuesta al ambiente. Para ello, se necesitan estudios con mayor nivel de detalle.

Por otro lado, los resultados de este trabajo se consideran de interés, ya que pueden proporcionar información valiosa para seleccionar genotipos de sitios mejor adaptados al estrés ambiental. Proyecciones futuras del clima, obtenidas de Climate Explorer (2019) (Figura 37a y 37b) se puede visualizar que el clima en América del Sur se vuelve cada vez más caliente. Teniendo en cuenta estas proyecciones, la producción de madera en el futuro podría estar limitada a sitios más secos. En este contexto y en base a estas proyecciones se podrían elegir sitios para obtención de semillas que se encuentren, más adaptados a estos cambios.

4.6. Correlación de la densidad básica con el color de la madera y propiedades dasométricas del árbol

La tabla 12 muestra las correlaciones de las propiedades del árbol y las variables colorimétricas. La densidad básica únicamente tuvo una correlación positiva y estadísticamente significativa con el DAP ($p < 0,05$) (Figura 38a), por lo que se espera que a mayor crecimiento la densidad media aumente $r = 0,54$ (Figura 38b), es decir, selección por crecimiento tendría una influencia directa sobre la densidad, para esta especie y sitios anali-

zados. Estudios efectuados por Díaz *et al* (2010) en una latifoliada de rápido crecimiento (*Populus deltoides*), también mencionan una correlación entre el DAP y la densidad básica media positiva y significativa, esto también fue reportado por Nicholas *et al.* (2007) en *Acacia melanoxylon* con $r = 0.22$, $p = 0.009$.

Otros trabajos realizados en Argentina, mencionan que la densidad de la madera puede ser independiente de la velocidad de crecimiento. Esto fue demostrado por Senisterra *et al.* (2005) en clones de álamo (*P. deltoides* x *P. x canadensis*), e Igartúa y Monteoliva (2010) en *E. globulos*, donde determinaron que no hubo correlación entre DB (medida al DAP) y el DAP.

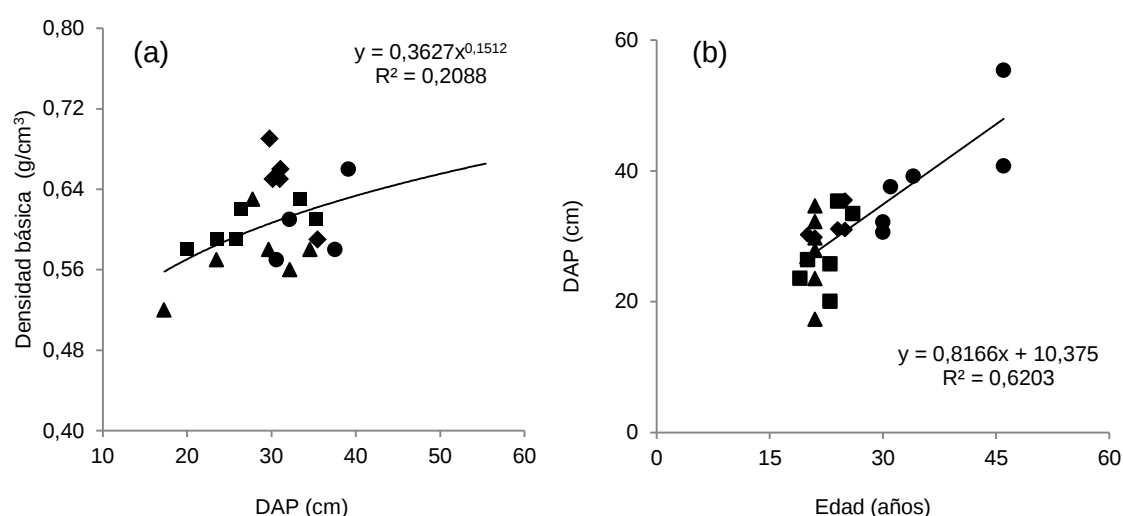


Figura 38 Relación entre la densidad básica con el DAP (a) y relación entre el DAP con la edad.
 ● Valores de Villa Ángela, ■ valores de Los Arias, ▲ valores de plantación (San isidro), ◆ valores de Isla Cuba. Fuente: Autor (2020)

Sotelo Montes y Weber (2009) afirman que una correlación positiva entre la densidad de la madera y el crecimiento del árbol, puede ser una respuesta adaptativa a la tensión de flexión producida por el viento en rodales naturales. Los árboles más grandes requieren una mayor fuerza en la base del tallo, en comparación con los árboles más pequeños. Esto puede ser particularmente importante para los árboles que crecen en rodales más abiertos que están potencialmente expuestos a velocidades del viento más altas. En general, el número de especies y árboles por unidad de área (es decir, densidad de rodales) es mayor en zonas con mayor precipitación, como por ejemplo el sitio de Villa Ángela, Chaco. En estas zonas, los sistemas de raíces y las copas de árboles vecinos pueden entretorse en diversos grados a lo largo del tiempo y permitir que el soporte reduzca "colectivamente" la tensión de flexión producida por el viento. Esta respuesta "colectiva"

al estrés por flexión sería menos evidente en zonas con menor precipitación y menor densidad de rodales. Los árboles en estas zonas pueden requerir una inversión relativamente mayor para aumentar su resistencia en la base del árbol (es decir, una mayor densidad de la madera) en comparación con los árboles en rodales que pueden "colectivamente" responder al estrés de flexión. Esto puede explicar, en parte, la respuesta de tendencias de maderas más densas en sitios más áridos para una misma especie.

El DAP además, estuvo positivamente correlacionado con la edad y la altura total con $r=0,54$ y $r=0,45$ respectivamente (Tabla 12). Esto también fue observado por Giménez *et al.* (2001).

Los análisis de correlación entre rasgos dendrométricos y las coordenadas del color (Tabla 12), indican correlaciones significativas ($p<0,05$) en el duramen de *Prosopis alba*. La densidad básica, presentó correlaciones negativas y significativas con todas las coordenadas del color, excepto con el ángulo de tinta, esto nos indica que maderas más densas son más oscuras, tienen menos pigmento amarillo, rojo y menor saturación, (Figura 39a, 39b, 39c, 39d).

Tabla 12. Correlaciones entre parámetros colorimétricos del duramen (L^* , a^* , b^* , C , h^*), propiedades dasométricas del árbol (edad, Ht: altura total, DAP: diámetro a la altura del pecho, Hf: altura de fuste, Vc: volumen de copa) y densidad básica (DB)

Rasgo	Rasgos dasométricos						Parametros				
	DB	Edad	Ht	DAP	Hf	Vc	L^*	a^*	b^*	C	h^*
DB	-										
Edad	0,21NS	-									
Ht	0,36NS	0,47 **	-								
DAP	0,47**	0,54**	0,45**	-							
Hf	0,22NS	0,41NS	0,09NS	-0,05NS	-						
Vc	0,17NS	0,42**	0,65**	0,68**	-0,28NS	-					
L^*	-0,62**	-0,14NS	-0,5**	-0,29NS	-0,22NS	-0,58**	-				
a^*	-0,53**	-0,01NS	0,13NS	-0,1NS	-0,003NS	0,06NS	0,22NS	-			
b^*	-0,70**	-0,32NS	-0,16NS	-0,43**	-0,3NS	-0,14NS	0,50**	0,85**	-		
c^*	-0,68**	-0,26NS	-0,1NS	-0,37NS	-0,25NS	-0,10NS	0,45**	0,91**	0,99**	-	
h^*	-0,27NS	-0,55**	-0,37NS	-0,47**	-0,44**	-0,24NS	0,55**	-0,33NS	0,22NS	0,09NS	-

Si bien estas tendencias y correlaciones encontradas son para el duramen de esta especie y estos sitios analizados. Una propuesta válida podría ser incrementar el número de muestras para estudios colorimétricos, lo que puede significar variaciones en estas tendencias, ya gran parte de la variabilidad $>70\%$ es debida al árbol.

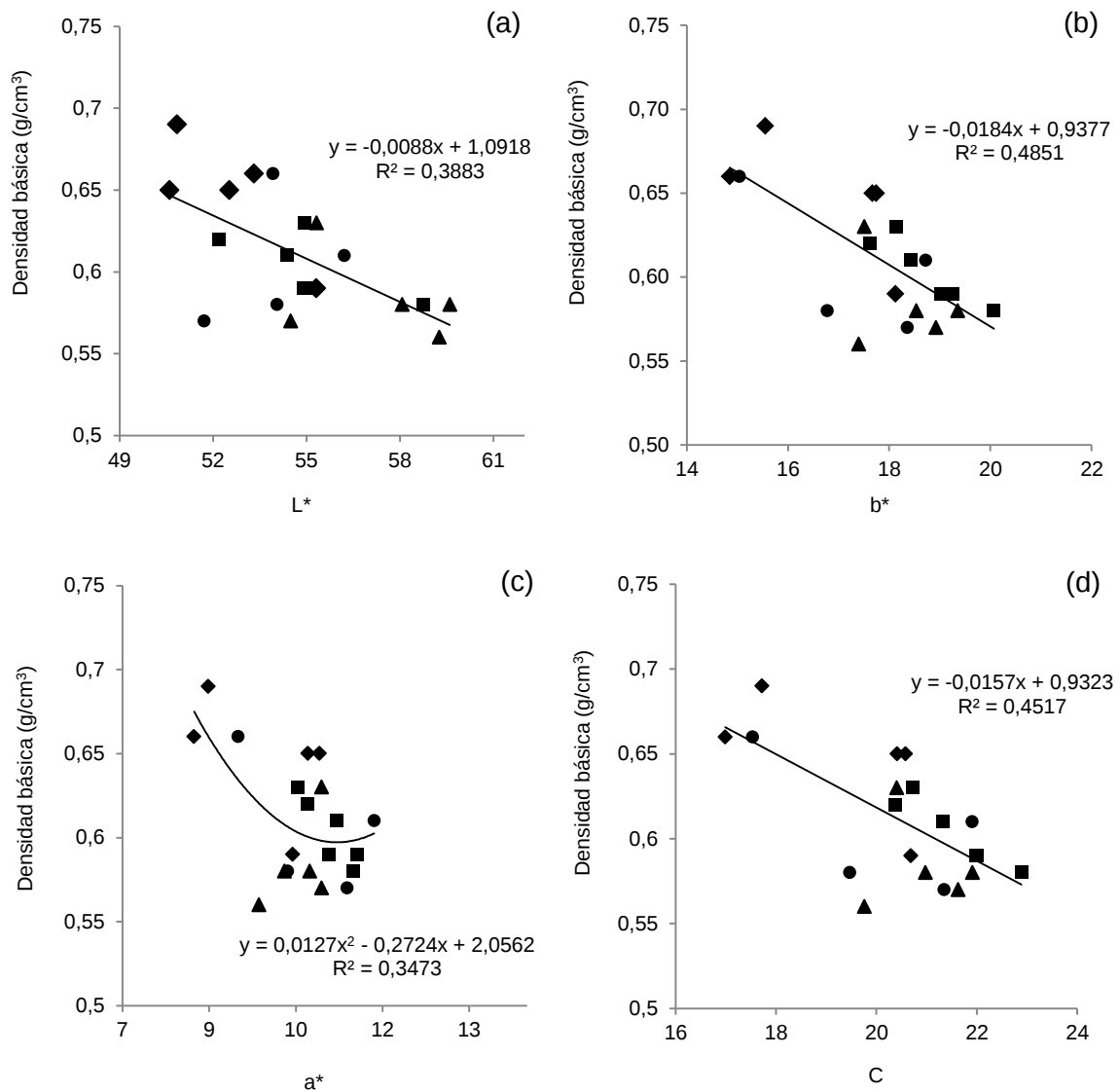


Figura 39 Relación entre la densidad básica y las variables de color (L, a*, b* y C). ● Sitio de Villa Ángela, ■ Los Arias, ▲ plantación (San isidro), ◆ de Isla Cuba. Fuente: Autor (2020).

En estudios similares efectuados por Garcia y Marinonio (2016) en *Tectona grandis* L. f., Garcia et al (2014) en *Eucalyptus* y *Corymbia*, Sotelo Montes et al (2008) en *Calycophyllum spruceanum*, encontraron correlaciones significativas entre la densidad básica y el color de la madera, siendo por lo general las maderas más densas también las más oscuras al igual que en el presente trabajo. Garcia et al (2014) encontraron que la densidad se correlacionaba negativamente con los parámetros L* y b* en sección longitudinal. Sin embargo, la correlación de la densidad con cada coordenada de color varía en función de las especies, por ejemplo Sotelo Montes et al (2008), corroboraron una relación positiva

entre la densidad de la madera y el parámetro a^* , es decir, maderas más densas tendieron a presentar un color rojizo más acentuado.

Nishino *et al.* (2000) encontraron tendencias similares al presente estudio únicamente entre la luminosidad (L^*) y el ángulo de tinta (h^*) con la densidad básica, es decir mayores densidades presentaban menores ángulos de tinta, esto también fue comprobado por Amorim *et al.* (2013) en *Eucalyptus* y *Pinus*. Estas correlaciones son una herramienta importante y puede tener un uso potencial en el control de calidad de madera, ya que la densidad es un indicador importante de la dureza, resistencia y durabilidad del leño (Moglia y López 2001).

Entre la edad y color también se corroboraron correlaciones significativas. Se determinó que en general los menores ángulos de tinta (h^*) en *Prosopis alba* se encuentran en árboles de mayor edad con $r = -0,55$ (Figura 40), por lo que la edad del árbol es un rasgo determinante en el tono de la madera. Esto puede deberse, en parte al depósito de sustancias que es mayor cuando el árbol es más viejo, Rosende (1995) citado por Galera (2000) mencionan que el contenido de taninos en individuos de 22 años es del 4% mientras que en individuos de 50 años es prácticamente el doble. Arce y Moya (2015) encontraron que clones de teca (*Tectona grandis*) plantados en Costa Rica eran a los 15 años de edad un poco más oscuro que cuando los árboles tenían 11 años.

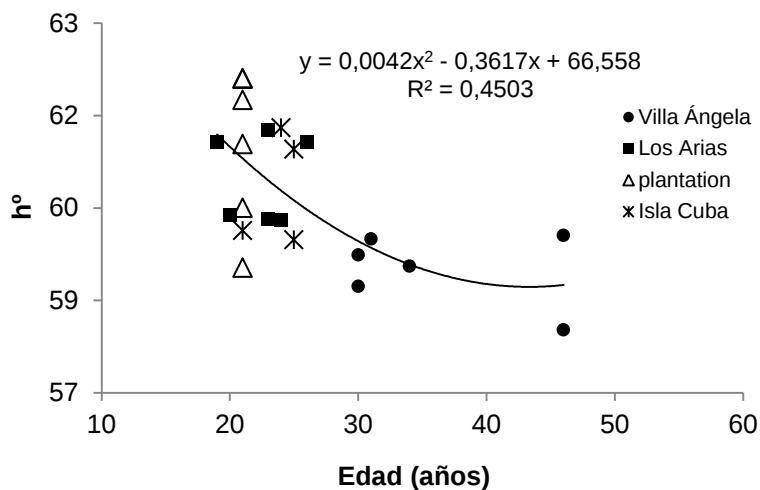


Figura 40 Relación entre el ángulo de tinta (h^*) y la edad del árbol. Fuente: Autor (2019)

Las correlaciones fenotípicas (Tabla 12), sugieren que puede haber una compensación dependiendo del tamaño de los árboles de *Prosopis alba*, lo cual se refleja en la correlación entre la altura total y volumen de copa con la luminosidad, la cual es negativa y significativa. Entre el DAP y las coordenadas b^* y C^* también mostraron correlaciones negati-

vas con $r = -0,52$ y $-0,50$, respectivamente, es decir, la madera de árboles más grandes (con mayor altura, copa y diámetros) tienden a ser más oscuras, por tener menor luminosidad, tono menos amarillentos y presentar menor saturación.

Estudios colorimétricos similares efectuados por Sotelo Montes *et al.* (2008) comprobaron correlaciones genéticas similares entre el DAP y el parámetro b^* ($r = -0,37$) en *Calyophyllum spruceanum* a los 39 meses de edad, donde los árboles más grandes tenían madera con un tono menos amarillento. Vanclay *et al.* (2008) por su parte, también determinaron una correlación negativa entre estas dos variables en *Eucalyptus dunnii*, sin embargo solo fue significativa la relación entre el DAP y el parámetro L^* ($r = 0,29$). Rink (1987), informó que solo la luminosidad tenía alguna relación estadísticamente significativa con las variables de crecimiento (diámetro y altura) $r = 0,23$ y $0,33$ respectivamente.

Estos resultados indican que variables de crecimiento están íntimamente ligadas a la colorimetría de la madera en esta especie. Por lo que, se consideran rasgos de importancia en el momento de la selección de árboles para aserrío.

4.7. Anatomía de madera

4.7.1. Parámetros microscópicos por sitio y dentro del árbol

En el Tabla 6 (ANEXO I) se muestran los resultados del análisis de la varianza para los distintos caracteres estudiados. Todas las características anatómicas presentaron diferencias significativas entre sitios (excepto porcentaje de vasos solitarios) y distancias (excepto longitud de radios y porcentaje de fibras), lo que denota la gran influencia de estas fuentes de variación en las respuestas de las variables analizadas. La interacción *sitio x distancia* solo fue significativa para algunas características anatómicas. La discusión de cada rasgo se realiza con más detalle en los próximos apartados.

En la tabla 13 se describen los valores promedios y desvíos estándar para las variables microscópicas en cada sitio.

Vasos: En la tabla 13 se aprecia que el sitio más húmedo, Villa Ángela, mostró la menor frecuencia de vasos y los mayores diámetros respecto a los demás sitios de estudio, sin embargo las diferencias existentes en el diámetro de los vasos entre sitios áridos y húmedos no son muy claras. Isla Cuba presentó los diámetros promedios de vasos más pequeños los cuales difieren estadísticamente de los demás sitios. En cuanto a la frecuencia de vasos, los sitios más áridos (Los Arias y San Isidro) mostraron mayor frecuencia y difieren estadísticamente de los sitios más húmedos (Villa Ángela e Isla Cuba). Estas tendencias entre sitios áridos y húmedos también fueron reportadas por Leal *et al.* (2003) en *Eucalyptus globulus*. Por lo que las condiciones ambientales, en estos sitios analizados, afectarían de forma significativa algunos rasgos de la arquitectura vascular del leño.

Estos valores promedios de diámetro y frecuencia de vasos son similares a los reportados por Bolzón *et al.* (2010) y por Moglia y Giménez (1998). En *Prosopis velutina* Wooton, Rodríguez Anda *et al.* (2015) encontraron frecuencias y diámetros similares al presente trabajo con valores promedios 11 vasos/mm² y 188 µm, respectivamente.

Moglia y López (2001) en *Aspidosperma quebracho blanco*, señalaron que el sitio no afectó la frecuencia y diámetro de los vasos, solo se observaron diferencias significativas entre árboles para el diámetro de los vasos. Este último comportamiento también fue reportado por Giménez y López (2002) en *Schinopsis lorentzii* tanto para el diámetro como la frecuencia de los vasos.

Villagra y Roig (1997) en la región del Monte, Argentina, analizaron el leño de dos especies de *Prosopis* y encontraron que *Prosopis argentina* tiende a ser xeromórfico por presentar un mayor porcentaje de vasos de pequeño diámetro, y un mayor número de vasos por grupo y por mm² que *Prosopis alpataco*, esto permite maximizar la seguridad del sistema hidráulico al proporcionar vías alternativas para la conducción de agua, especialmente en las especies que carecen de traqueidas.

Tabla 13. Estadística descriptiva para rasgos anatómicos en la madera de *Prosopis alba*, discriminado por sitio

Rasgos		Isla Cuba	Los Arias	San Isidro (plantación)	Villa Ángela
Vasos	Diámetro vaso (µm)	128,5a (50-250)	141,5b (40-250)	139b (50-250)	142,42b (40-250)
	Frec. vasos (Nº/mm ²)	7,1a (3-14)	8,7b (3-24)	8,8b (3-21)	6,76a (3-18)
Fibra	Espesor pared (µm)	4,4a (1-6)	4,2a (3-5)	3,9a (1-5)	3,56b (1-5)
Radios	Longitud de radio (µm)	253,9a	329,1b	347,6b	364,96b

		(70-680)	(60-860)	(80-850)	(50-1230)
	Ancho de radio (μm)	46,5a (10-90)	49,2ab (20-90)	61,3c (20-100)	51,48b (20-100)
	Radios/mm lineal	6,1a (2-9)	5,1b (3-8)	4,7c (2-8)	5,19b (3-12)
Composición de tejidos	Vasos (%)	15,6a (5-33)	20,8b (10-33)	19,9b (6-33)	17,5ab (9-35)
	Parénquima (%)	21,4a (6-39)	34,8b (15-55)	32,2b (18-55)	35,8b (21-50)
	Fibras (%)	49,4a (31-71)	30,6b (8-48)	30,9b (12-48)	30b (13-47)
	Radios (%)	13,7a (4-24)	13,9a (5-26)	17,1b (7-25)	17b (4-30)
Tipos de vasos	Solitarios (%)	49,1a (25-71)	51,8a (36-67)	48,5a (25-69)	57,6a (41-75)
	Múltiples (2,3) (%)	43a (26-66)	33,2b (20-47)	34,3b (24-49)	33b (17-50)
	Múltiples Largos (%)	7,9a (0-23)	15,0bc (2-35)	17,3c (1-43)	9,4ab (0-26)
Tipos de radios	Uniseriado (%)	0,6a (0-3)	2,4b (0-9)	0,98a (0-6)	3,4 b (0-14)
	Biseriado (%)	9,8a (2-21)	14,8b (2-30)	9,7a (1-31)	10,1a (1-28)
	Triseriados (%)	16,6a (2-32)	18,6a (5-44)	9,1b (0-32)	13,7ab (2-47)
	Multiseriados(%)	72,9ab (60-90)	64,2b (28-93)	80,2a (34-96)	72,8a (29-95)

En el presente trabajo, se aprecia que los diámetros tangenciales de vasos de sitios áridos y húmedos no difieren estadísticamente, esto puede deberse en parte a las estrategias adaptativas en otros tejidos de la planta. Por ejemplo: Moglia y Giménez (1998), mencionan la presencia de traqueidas vasicéntricas en algarrobo blanco, una de las funciones de estos elementos traqueales imperforados es ser un sistema de conducción subsidiario o alternativo (Moglia y López 2001), que cumplen la misma función que los vasos agrupados (Moglia y Giménez 1998). Otra posible estrategia adaptativa de esta especie, por la cual sería indistinto el tamaño de los vasos entre los sitios, puede deberse a lo planteado por Villagra *et al* (2010) quien asegura que la presencia de raíces freatófitas en árboles y arbustos del género *Prosopis* permite su supervivencia en sitios muy xéricos. Jobbágy *et al.* (2011) demostraron que los árboles de *Prosopis flexuosa* que crecen en valles donde el nivel freático es de 7–13 m de profundidad, absorben agua subterránea durante la sequía y de lluvia en el período lluvioso, por lo que esta especie se comportaría como freatófitos facultativos en ambiente extremadamente árido. Carlquist y Hoekman (1985) señalaron que las plantas freatófitas en los desiertos son esencialmente oportunistas en su capacidad para desarrollar raíces profundas, por lo tanto, las adaptaciones de madera a la sequía son relativamente pocas.

Considerando las distancias a la médula, el diámetro de los vasos tiene una tendencia radial creciente y evidencia un aumento total de un 28%, desde la médula a la corteza (Figura 1a, ANEXO II), mientras que la frecuencia de los vasos tendió a decrecer radialmente, excepto en la plantación y la distancia "D" del sitio mas húmedo donde la frecuencia tuvo leves aumentos (Figura 1b, ANEXO II). Similares comportamientos en la frecuencia y diámetro de vasos fueron reportados por Moglia y López (2001), Tsuchiya y Furukawa (2009), Veenin *et al.* (2005), Leal *et al* (2003) en otras especies de madera dura.

Fibra: Villa Ángela fue el sitio que mostró los menores espesores de paredes en fibras, el cuál difiere estadísticamente de los otros sitios ($p < 0,05$) (Tabla 13), posiblemente por tratarse del sitio más húmedo con 1100 mm de precipitación media anual. Según el listado de características microcópicas de la IAWA (Wheeler *et al.* 1989) los espesores de pared pueden clasificarse como "gruesos" en todos los sitios, excepto Villa Ángela donde mostraron tener fibras con espesores de pared delgada a gruesa. Similares valores de espesores de pared también fueron reportados por Rodríguez Anda *et al.* (2015) y Bolzón *et al* (2010) en *Prosopis velutina* y *Prosopis alba* respectivamente. La longitud, diámetro y espesor de la pared celular influyen directamente en la densidad de la madera (Carrillo-Parra, 2007). Zieminska *et al.* (2013), Martínez-Cabrera *et al.* (2009), Jacobsen *et al.* (2007), mencionan que la densidad de la madera generalmente está bien correlacionada con las propiedades de la fibra, especialmente la fracción de la pared de la fibra.

Radialmente los espesores de pared de fibras aumentaron (Figura 2, ANEXO II), existen diferencias significativas en este rasgo dentro del árbol, las distancias mas próximas a la médula mostraron espesores de pared significativamente ($p < 0,05$) menores, respecto a las demas distancias. Giménez (2000), en *Schinopsis lorentzii*, no reportó diferencias significativas entre árboles ni grupos de edades (tratamientos) en este rasgo. Sin embargo, estudios efectuados por Lei *et al* (1997) reportaron en *Alnus rubra* que anillos de crecimiento más estrechos están asociados a mayores espesores de pared celular, Giménez *et al.* (2001), Juárez de Galíndez *et al* (2007), Giménez *et al.* (2009), en especies de *Prosopis* reportaron que a mayores edades (distancias desde la médula) tienden a presentar anillos mas estrechos. Esto explicaría, en parte, la variabilidad radial del espesor de la pared de las fibras en algarrobo blanco.

Radios: tanto la longitud como el ancho de los radios y el número de radios por mm² mostraron diferencias significativas entre los sitios de estudios. Isla Cuba, mostró en promedio la mayor cantidad de radios por milímetro lineal pero menores longitudes y anchos, respecto a los demás sitios, este comportamiento podría ser una estrategia que tiene la especie para compensar el tamaño de estos elementos, mayor cantidad de radios a costos de tener menor tamaño.

La morfometría y frecuencia de radios se encuentran dentro del rango de valores observado por Bolzón *et al* (2010) en *Prosopis alba* y otras especies de *Prosopis* (Villagra y Roig 1997, Rodríguez Anda *et al.* 2015).

Rodríguez Anda *et al.* (2015) menciona que los radios más grandes (multiseriados) generan puntos débiles en la madera, ya que esfuerzos mecánicos tienden a originar fisuras a lo largo de ellos, lo cual influye en la calidad de la madera. Por lo que incide negativamente en las propiedades mecánicas y en la contracción tangencial de la madera (Bárceñas *et al.*, 2002). Aunque, según Tortorelli (2009) contribuye de manera positiva en sus características estéticas por generar un mejor veteado y brillo.

Radialmente la longitud y el ancho de radios aumentan, mientras que la frecuencia disminuye (Figura 3a, 3b, 3c, ANEXO II), por lo que el tamaño de los elementos se compensan por la frecuencia de radios, con aumentos radiales. Giménez (2000) en otra especie de madera dura no encontró diferencias significativas radialmente en estos rasgos.

Composición de tejidos: en cuanto al porcentaje de tejido del leño de *Prosopis alba*, es posible apreciar que en todos los sitios, más del 60% de los tejidos constitutivos son las fibras y el parénquima axial, en Isla Cuba el porcentaje de fibras fue destacado respecto a los demás sitios con un 49%. El porcentaje de vasos entre los sitios fue, en promedio entre 15 a 20%, algo superior a lo reportado por Bolzón *et al.* (2010). En cuanto al parénquima axial y radial constituyen entre el 30 al 40% del tejido xilemático, estos resultados son respaldados por Giménez *et al.* (2001) y Bolzón *et al.* (2010). El sitio de Isla Cuba difiere estadísticamente del resto de los rodales nativos en la composición de tejidos, excepto el porcentaje de radios, donde Los Arias e Isla Cuba no difieren estadísticamente (Tabla 13). Similares proporciones de tejidos constitutivos en el leño también fueron reportados Ziemska *et al.* (2013) en 24 angiospermas australianas.

Pratt *et al* (2007) mostraron en nueve especies de Rhamnaceae, que menores porcentajes de parénquima se relacionan con el Ψ_{50} más negativos. Por lo que, sitios con menor cantidad de parénquima, en este caso Isla Cuba, podría tener ciertas ventajas, desde el punto de vista anatómico en las funciones fisiológicas adaptativas, bajo condiciones de mayor estrés. Sin embargo, se necesitan otros estudios relacionados a la fisiología de esta especie que permitan entender estas estrategias.

Radialmente dentro del árbol, el porcentaje de todos los tejidos variaron significativamente $p < 0,05$, excepto el porcentaje de fibras donde solo la interacción *sitio x distancias* fue significativa (Tabla 6, ANEXO I). El porcentaje de parénquima axial tiende a disminuir radialmente, mientras que el porcentaje de vasos y radios aumentan (Figura 4, ANEXO II). Tendencias similares, para algunos tejidos fueron reportadas por McDonald *et al* (1995) Gartner *et al* (1997) en otras latifoliadas.

Tipo de vasos: en relación al tipo de vasos predominan los solitarios (Figura 41), con un rango entre 48 a 57%, seguido de los vasos múltiples de 2-3, que varían de 33 a 43% entre sitios. Tanto los vasos múltiples largos como los múltiples de 2-3 presentan diferencias significativas entre sitios y distancias a la médula (Tabla 13). Los vasos solitarios solo presentaron diferencias significativas entre las distancias a la médula.

Radialmente los vasos solitarios, múltiples de 2-3 y múltiples largos mostraron diferencias significativas. Los dos primeros tipos de vasos tienden a disminuir radialmente dentro del árbol, mientras que los vasos múltiples largos tienden a aumentar con mayores distancias a la médula (Figura 4, ANEXO II). Giménez (2000), en quebracho colorado, únicamente reportó diferencias significativas para los vasos múltiples de 3-4, que aumentaron significativamente con la edad (distancias a la médula). En base a estos resultados, podemos afirmar que el agrupamiento de los vasos es evidente dentro del árbol.

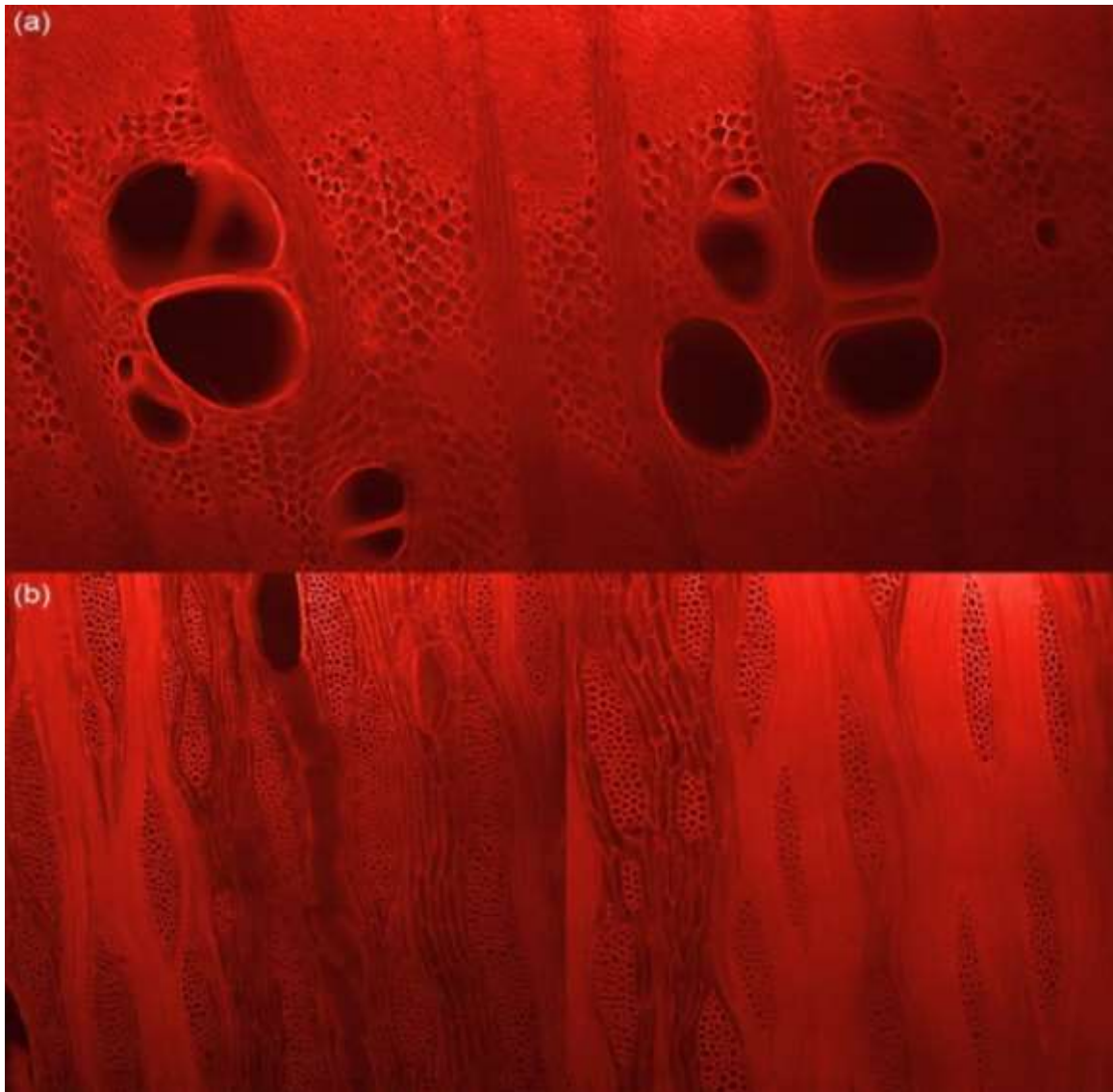


Figura 41 Sección transversal y longitudinal tangencial del leño *Prosopis alba* con fluorescencia.
Fuente: Autor (2020)

Sitios de menor precipitación media anual (San Isidro y Los Arias) (Tabla 13), tienden a presentar el mayor porcentaje de vasos múltiples largos, esto podría tener relación con aspectos fisiológicos relacionados al transporte de agua. En relación a esto, Giménez y Moglia (2017), Robert *et al* (2009), Hacke y Sperry (2001), Moglia y Giménez, (1998), Lindorf (1994), menciona que la alta densidad y agrupación de vasos, los vasos pequeños y los miembros de vasos cortos, se han mencionado como adaptaciones para evitar la reducción de la capacidad hidráulica, mejorando la seguridad en la conducción. Esto podría explicar, en parte, el aumento en más de un 50% del porcentaje de vasos múltiples largos en sitios de menor precipitación respecto a los sitios de mayor precipitación (Villa Ángela e Isla Cuba).

Como se aprecia en la Figura 42, disminuciones en el diámetro de los vasos van acompañados por leves aumentos en la frecuencia de vasos. Numerosos autores realizaron interpretaciones valiosas a estas tendencias, tales como las efectuados por Zimmermann (1983) quienes mencionan que los vasos más estrechos, aunque menos eficientes para la conducción de agua, se consideran más seguros en ambientes más secos, ya que permiten el desarrollo de mayores presiones negativas antes de que se formen embolias y causen la pérdida de la función del vaso. Tendencias similares también fueron reportadas por Giménez y Moglia (2017), en distintos ambientes de la Región Chaqueña. Esto puede considerarse unos rasgos importantes cuando se seleccionan sitios o genotipos para plantaciones, ya que tendrían ciertas características para resistir posibles cambios ambientales.

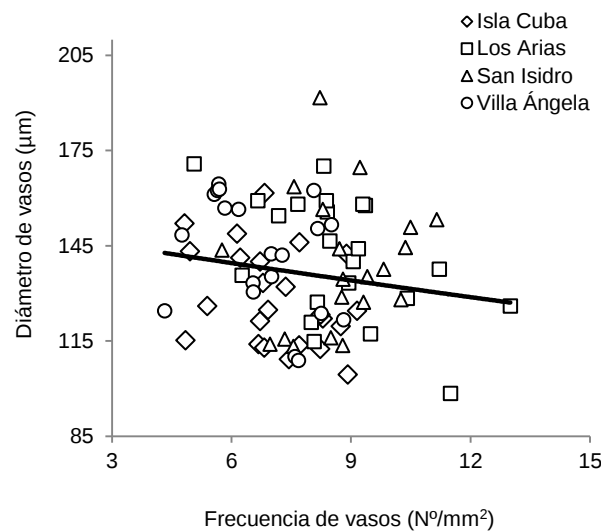


Figura 42 Relación entre diámetro y frecuencia de vasos.
Fuente: Autor (2020)

La arquitectura hidráulica de la madera, en *Prosopis alba*, tiene tendencias de estar preparada ante cambios en la disponibilidad hídrica, ya que apreciaciones personales del autor detectaron que en vasos múltiples largos, existen una combinación de tamaños de vasos grandes y pequeños, por lo que el leño estaría preparado tanto para maximizar su eficiencia en la conducción, como así también incrementar su seguridad.

Sin embargo el análisis de Kruskal-Wallis para el índice de vulnerabilidad (IV) nos indica, que existen diferencias significativas entre los sitios de estudio $p=0,0056$. Villa Ángela (sitio con mayor precipitación media anual) presenta los mayores valores y difiere estadísticamente de los sitios más áridos (Los Arias y San isidro, Santiago del Estero) (Figuras 43), por lo que el sitio más húmedo sería más eficiente en la conducción de agua.

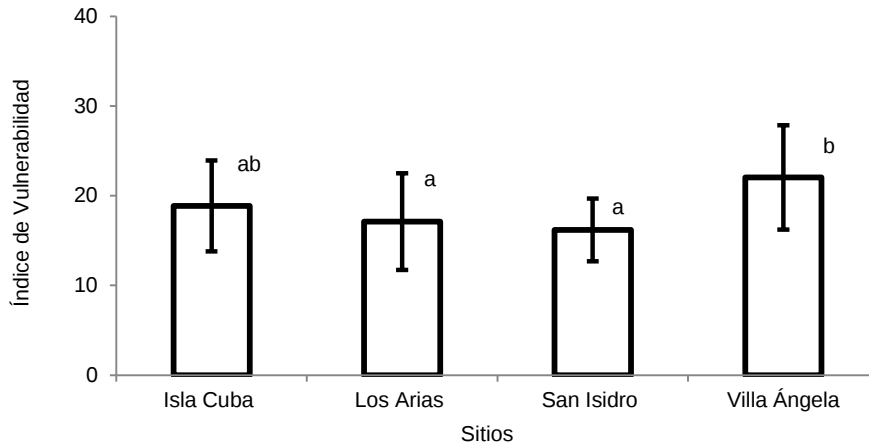


Figura 43 Índice de vulnerabilidad por sitios.

Fuente: Autor (2020)

Estudios similares en la Región Chaqueña Argentina revelaron, en especies de *Prosopis* incluyendo al algarrobo blanco, índices de vulnerabilidad relativamente altos (3-30) (Moglia y Giménez, 1998, Giménez y Moglia 2017). Otros autores Lindorf (1994), León (2005) encontraron rangos mucho más amplios, de índices de vulnerabilidad en bosques tropicales muy secos de Venezuela, entre 1,6-93, para distintas especies de leguminosas. En tanto, Montaña-Arias *et al.* (2013) basándose en este índice determinó que 5 especies de leguminosas presentaron poca resistencia al estrés hídrico. Esto puede ser debido a las posibles estrategias adaptativas de las especies para tolerar estrés, algunas de las cuales fueron ya mencionadas en párrafos anteriores. Según reportes de López (2005) un 63% del total de las especies del género *Prosopis*, se distribuyen en ambientes áridos y semiáridos de Argentina. Lindorf (1994) asegura, que la arquitectura hidráulica es solo una forma, de las múltiples que existen en las plantas, para sobrevivir en situaciones de estrés hídrico.

En todos los sitios el índice de vulnerabilidad fue superior a 1 (Figura 44). Estos valores indicarían que la especie tiende a ser eficiente en la conducción de agua en el xilema, a costo de su seguridad. Para entender estos mecanismos con más certeza entre ambientes e individuos, sería conveniente colocar en el análisis otros aspectos relacionados a presos fisiológicos o adaptaciones de órganos en las plantas.

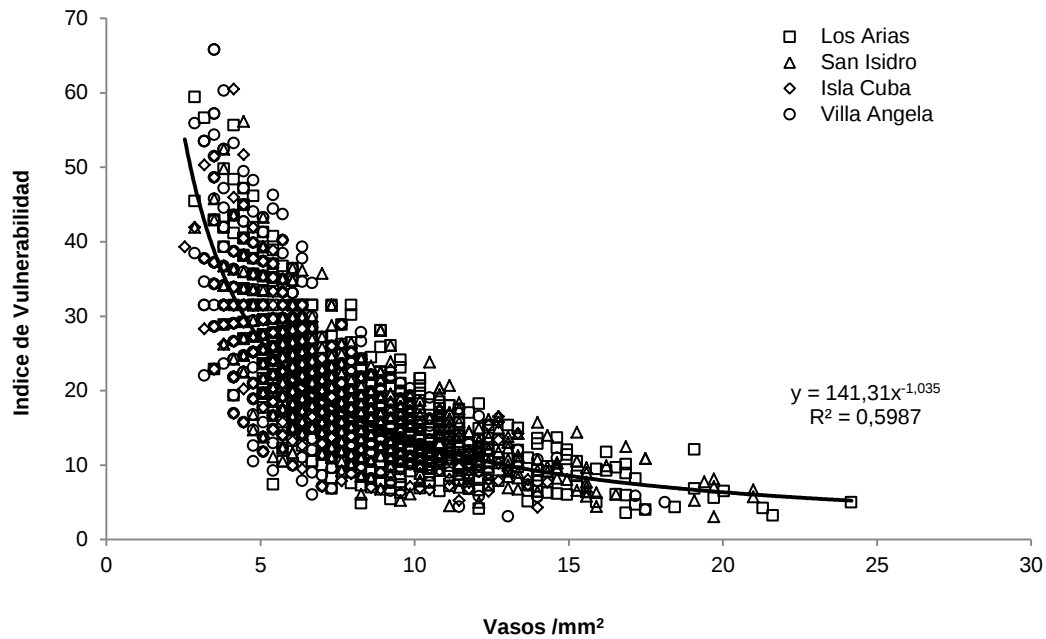


Figura 44 Índice de vulnerabilidad en función de la frecuencia de vasos en *Prosopis alba* en distintos sitios de la Región Chaqueña Argentina.

Fuente: Autor (2020)

Choat *et al.* (2012) mencionan que los sistemas áridos contienen especies vulnerables y resistentes, y que los sistemas húmedos, como los bosques tropicales húmedos, solo contienen especies que son relativamente vulnerables a la cavitación. La explicación probable de tener maderas mesomórficas en ambientes semiáridos como en Santiago del Estero, podría ser el efecto “mitigante” de la presencia de otros órganos vegetales adaptados al xerofitismo (Moglia y Giménez, 1998). En este caso, podría deberse a raíces freatófitas (Jobbagy *et al* 2011). Villagra *et al.* (2010) sostienen que una de las estrategias en los *Prosopis*, en ambientes áridos, es desarrollar un sistema radical dimórfico extenso, con una raíz vertical pivotante de varios metros de longitud y raíces superficiales, que se extienden lateralmente más allá del área ocupada por las copas, lo cual facilita el acceso de agua tanto en profundidad como en superficie.

Tipo de radios: en algarrobo blanco predominan los radios multiseriados los cuales difieren estadísticamente entre los sitios, los mismos varían entre 64-80%.

Martínez-Cabrera *et al.* (2009), mencionan que grandes áreas de parénquima pueden comprometer la estabilidad mecánica cuando se combinan con paredes de fibras delgadas. Como se puede apreciar en la tabla 13, el sitio con el mayor porcentaje de radios

multi-seriados fue Villa Ángela con un 72% (sitio de mayor precipitación), fue también el sitio que presentó mayores lúmenes en las fibras; de acuerdo con lo mencionado por Martínez Cabrera *et al.* (2009), este sitio, podría tener menor estabilidad dimensional que sitios de zonas más áridas, donde los espesores de pared son mayores.

Dentro del árbol los radios uniseriados, biseriados y triseriados tienden a disminuir de médula a corteza, mientras que los radios multiseriados tienen a aumentar radialmente (Figura 6, ANEXO II). En todos los tipos de radios, las distancias desde la médula, mostraron diferencias significativas (Tabla 6, ANEXO I). Estudios realizados por Giménez (2000), en la región del Chaco, reportaron que los radios multiseriados en quebracho colorado, no mostraron diferencias significativas entre grupos de edad.

Estos resultados nos indican que posiblemente las variaciones en las proporciones de los diferentes tipos de tejidos le han permitido a la especie ampliar su rango de distribución.

Como se verificó, diferentes condiciones ambientales en la misma especie generan diferencias en los distintos rasgos anatómicos. Esto nos permite inferir que la especie, modifica proporciones de los diferentes tipos de tejidos, generando posiblemente estrategias adaptativas en los distintos sitios, como resultado de las condiciones ambientales. Villagra (2000) menciona que en Argentina, el género *Prosopis* sufrió un proceso adaptativo desde el Chaco subhúmedo hacia zonas más áridas y frías al oeste y al sur, siendo este proceso como resultado de adaptaciones morfológicas y fisiológicas, como reducción foliar, ajuste osmótico, entre otros. En este contexto y en base a los resultados obtenidos, *Prosopis alba* tiende a tener una cierta plasticidad desde el punto de vista anatómico, esto hace que la distribución de esta especie alcance una gran variedad de condiciones ambientales.

4.8. Correlación de la anatomía del leño con la densidad básica

La densidad básica se correlacionó ampliamente con numerosos caracteres anatómicos del leño (Tabla 7, ANEXO I). Presentó una correlación negativa y significativa con el diámetro de los vasos ($r = -0,24$, $p = 0,0321$), al igual que con la longitud y ancho de los radios ($r = -0,28$, $p = 0,0124$ y $r = -0,46$, $p < 0,0001$ respectivamente), es decir que maderas de xilema más denso tienden a tener menores diámetros de vasos y radios más pequeños, (Figura 45a, 45b, 45c). Este último rasgo tendió a acentuarse en sitios más áridos.

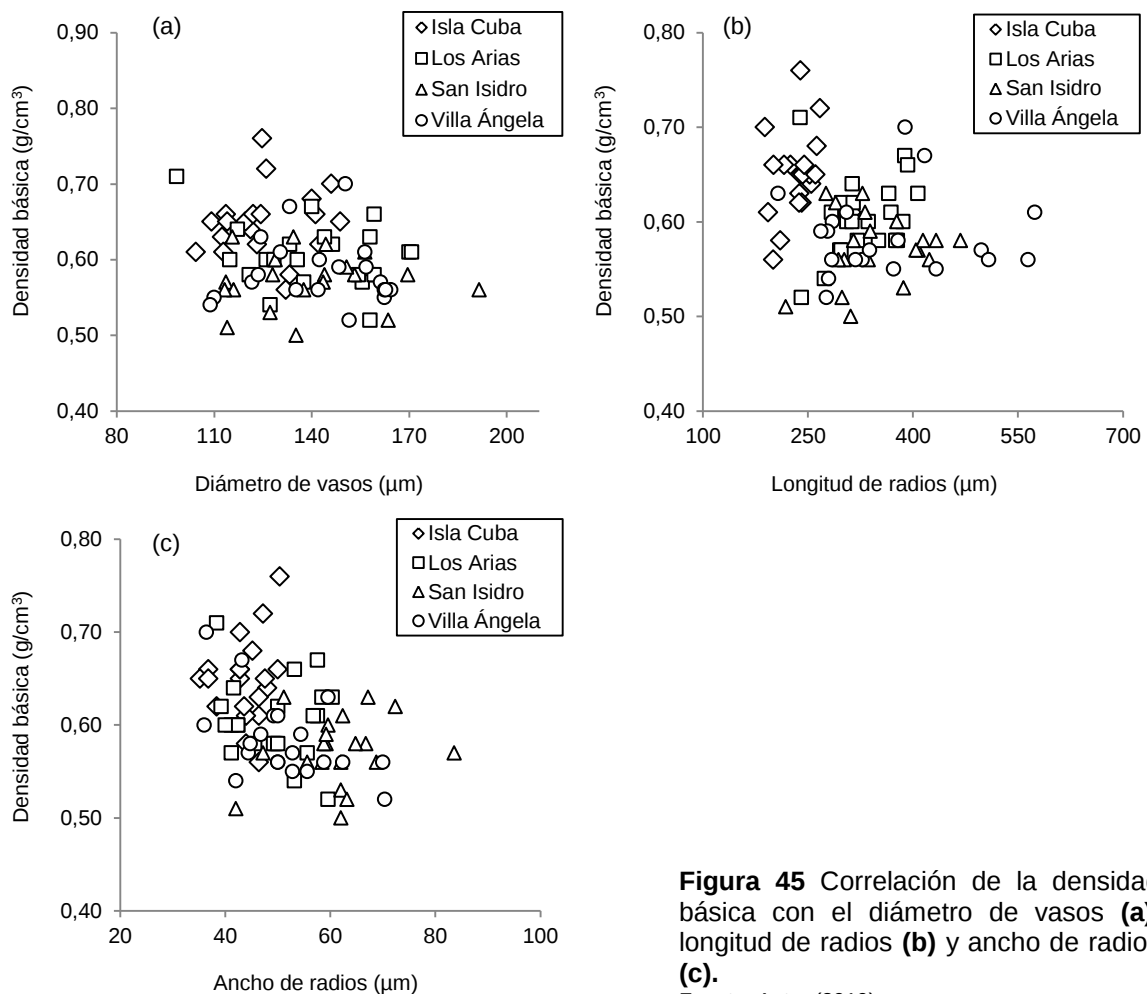


Figura 45 Correlación de la densidad básica con el diámetro de vasos **(a)**, longitud de radios **(b)** y ancho de radios **(c)**.

Fuente: Autor (2019)

Estudios efectuados por Monteoliva *et al.* (2017) encontraron una correlación negativa entre la densidad de la madera con el diámetro de los vasos, en distintas especies de *Eucalyptus*. Esto también fue corroborado por Zheng y Martínez Cabrera (2013) en 800 especies chinas, por Jacobsen *et al.*, (2007) y Preston *et al.*, (2006) con el porcentaje del área de vaso y la fracción del vaso, respectivamente. Hacke *et al.* (2001) mencionan que

el tamaño de los vasos está relacionado con la densidad de la madera, ya que las especies de maderas densas generalmente tienen vasos más pequeños, lo que confiere mayor resistencia a la cavitación en el xilema inducida por la sequía y menores tasas de transporte de agua (Zieminska *et al* 2013).

En este estudio menores longitudes y anchos de radios generan una mayor densidad. Por lo que el tamaño de los radios en esta especie afecta directamente la densidad del xilema. Zheng y Martínez-Cabrera (2013) plantearon que una proporción diferencial en el tamaño de los radios pueden influir en las propiedades mecánicas del leño, así como en aspectos hidráulicos (capacidad de reparación de embolias o el transporte de sustancias osmóticamente activas a principios de primavera). Sin embargo, estudios fisiológicos más profundos son necesarios para comprender estos mecanismos en esta especie.

La densidad básica se asoció con el porcentaje de tejidos. Existe una correlación significativa y positiva con el porcentaje fibras ($r = 0,59$, $p < 0,0001$) y negativa con el parénquima axial y radial ($r = -0,48$, $p < 0,0001$ y $r = -0,42$, $p = 0,0001$ respectivamente), mientras que el porcentaje de vasos no se correlacionó en forma significativa con la densidad de la madera (Tabla 7, ANEXO I). Esto nos indica que aumentos en la densidad de la madera van acompañados por el aumento del porcentaje de fibras, pero disminución del tejido parenquimático axial y radial (Figura 46). En las figuras 46a, 46b y 46c, se aprecia claramente que árboles de sitios más áridos como Isla Cuba y Los Arias (sitio de mayor temperatura media anual) presentan el mayor porcentaje de fibras y la menor cantidad de parénquima axial y radial.

Fueron pocos los estudios en esta especie donde se relacionó el porcentaje de tejidos con la densidad de la madera, es por ello que la discusión de los resultados se centra en estudios de otras especies. En investigaciones similares efectuados por Martínez Cabrera *et al* (2009), Zheng y Martínez-Cabrera (2013) encontraron que la mayoría de los rasgos de vasos fueron independiente de la densidad de la madera, similar a lo reportado en la presente tesis.

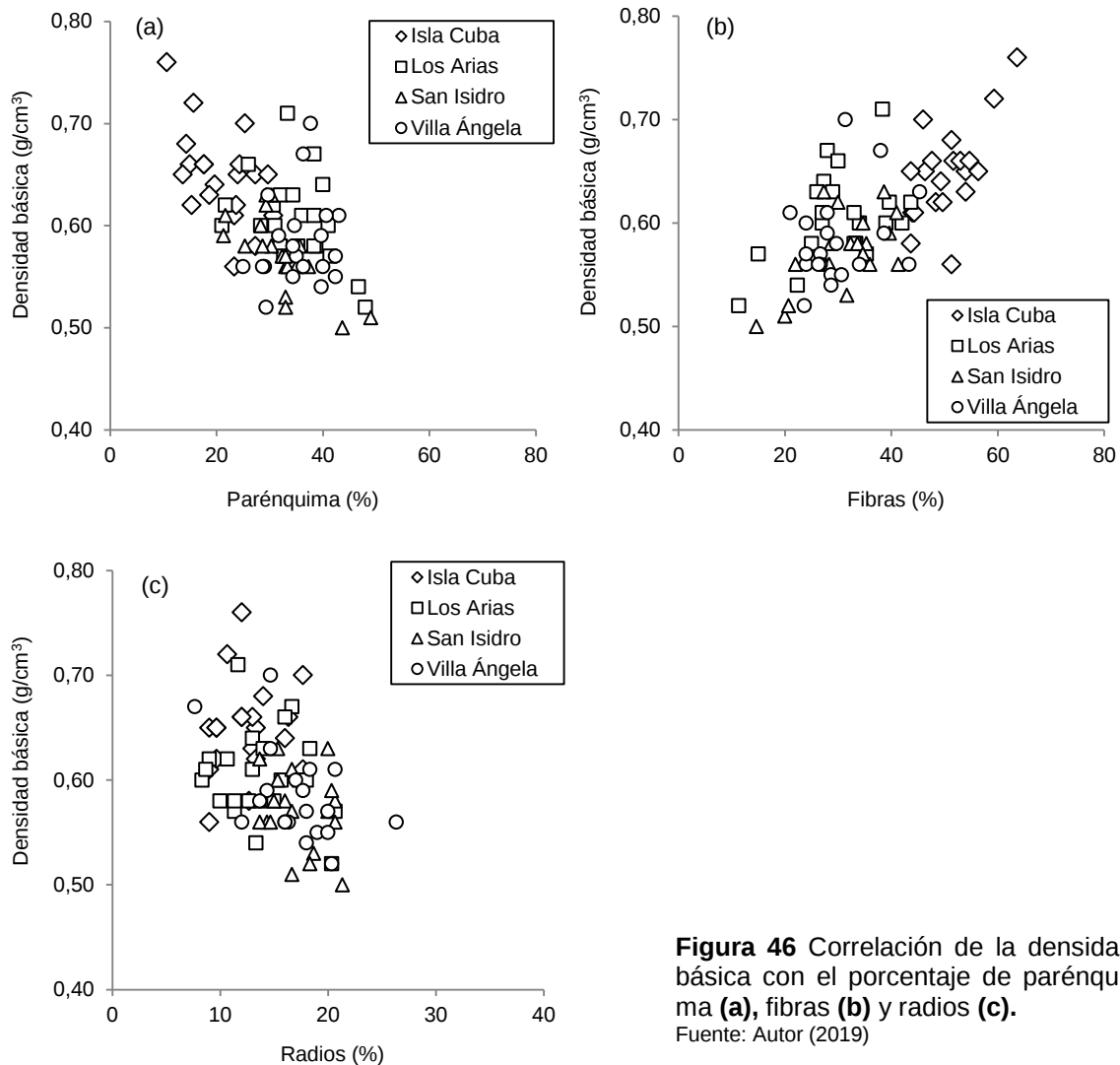


Figura 46 Correlación de la densidad básica con el porcentaje de parénquima (a), fibras (b) y radios (c).
Fuente: Autor (2019)

Los resultados pueden cambiar según la especie analizada. Algunos estudios encontraron relaciones positivas entre la densidad y el porcentaje de radios (Fujiwara *et al.*, 1991, Zheng y Martínez-Cabrera 2013, Monteoliva *et al.* 2017) y negativas con parénquima axial (Jacobsen *et al.*, 2007, Zheng y Martínez-Cabrera 2013). Sin embargo, en estudio previos efectuado por Martínez-Cabrera *et al.*, (2009) en 61 especies de arbustos en diversos entornos de lluvia, encontraron que la densidad del leño aumentó con el porcentaje de parénquima axial, pero disminuyó con el porcentaje de parénquima de radios. Estos autores hallaron que especies con baja densidad de madera de sitios húmedos tienen una alta proporción de radios y menos parénquima axial, que las especies de áreas más secas, en nuestro estudio las tendencias solo fueron similares entre la densidad y el porcentaje de radios.

Esto podría indicar que las maderas con una alta fracción de parénquima vivo, probablemente incurrirían en mayores costos de mantenimiento que las maderas con una alta fracción de fibras no vivas. Entonces hipotéticamente la ventaja de tener una alta fracción de parénquima, podría ser asegurar un alto contenido de nutrientes (Tyree y Zimmermann 2002, Zanne *et al* 2010), o bien una alta capacidad para reparar de embolias (Pratt *et al* 2007, Zheng *et al* 2013, Zieminska *et al* 2013). Ambas funciones, puede ser beneficioso en algunos aspectos ecológicos. Estos aspectos sobre los vínculos causales entre la estructura anatómica de la madera y las estrategias ecológicas requieren una investigación adicional y abren caminos interesantes para futuras investigaciones.

Se demostró además que los radios también influyen en el MOE radial, ya que existe una relación directa entre este parámetro mecánico y la proporción de radios en una sección transversal (Burgert y Eckstein, 2001). Jacobsen *et al.* (2007), encontraron que tanto la densidad de la madera y el módulo de ruptura (MOR) estaban directa y significativamente relacionados con el porcentaje de parénquima ($p < 0,05$) por área transversal del xilema. Guitard y El Amri (1987) encontraron que si bien una mayor proporción de radios aumenta el MOE radial, también limita el MOE longitudinal para una densidad de madera dada, donde las propiedades longitudinales son los determinantes mecánicos más importantes en los tallos

El porcentaje de fibras fue inconsistente con la densidad. Se observaron relaciones positivas y significativas en algunos estudios (Jacobsen *et al.*, 2007; Zieminska *et al.*, 2013) o no significativas (Poorter *et al.*, 2010; Zheng y Martínez Cabrera *et al.*, 2013). Patrones globales en la anatomía de madera y su relación con la densidad fueron evaluados por Zanne *et al.* (2010) donde encontraron una correlación débil entre la densidad de la madera y la fracción de tejidos sin lumen (1-F). El tejido xilemático sin lumen probablemente varía en densidad, debido a la variación en la fibra, las paredes de los vasos y el parénquima, esto fue confirmado por Hacke y Sperry (2001), Hacke *et al.* (2001), Jacobsen *et al.* (2007), Chave *et al.* (2009).

En este contexto, en base a estos resultados, se puede decir desde el punto de vista de calidad de madera, que rodales nativos de sitios áridos generan maderas más densas.

El histograma de tipos de vasos con la densidad de la madera, se correlacionó únicamente con los vasos múltiples largos, quienes tuvieron una correlación muy débil y negativa ($r = -0,23$, $p = 0,0124$). En la Figura 47a, se aprecia que la densidad básica tiende a disminuir con el aumento de vasos múltiples largos hasta un cierto punto, a partir del cual la

densidad se mantiene constante. Aumentos elevados en la cantidad de vasos agrupados van acompañados de un aumento en la frecuencia de vasos por mm^2 (Figura 47b), esto requiere una mayor cantidad de tejido de sostén que le permitan soportar grandes potenciales hídricos en la conducción de agua para que no colapsen (Hacke y Sperry 2001).

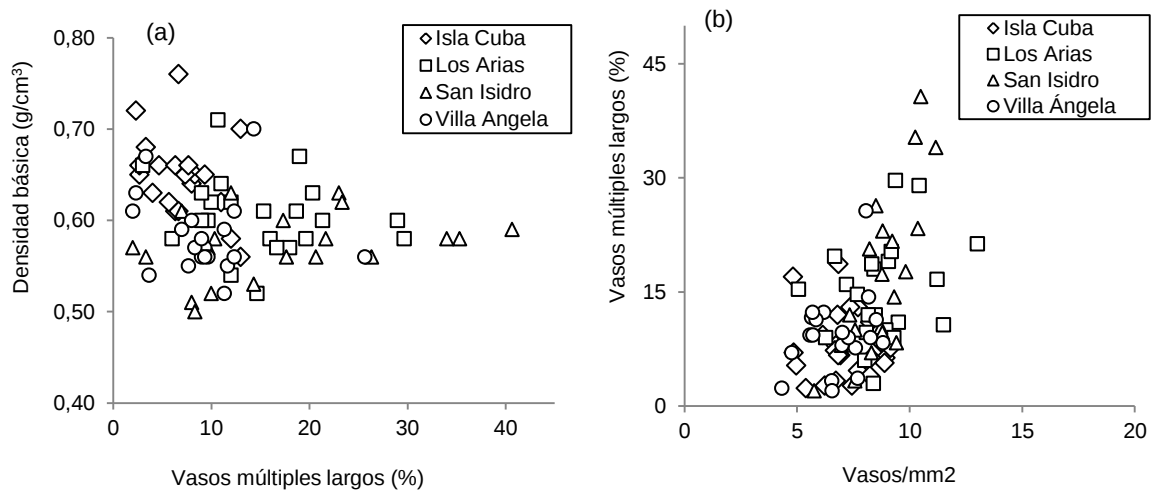


Figura 47 Correlación entre la densidad básica con los vasos múltiples largos (a) y vasos múltiples largos con la frecuencia de vasos (b).

Fuente: Autor (2020)

La densidad básica se correlacionó en forma positiva pero débil con el porcentaje de radios biseriados ($r=0,28$ $p=0,01$) y triseriados ($r= 0,31$ $p=0,004$) (Figura 48). Esto nos indica que en maderas más densas existe una tendencia de aumentar en la cantidad de radios biseriados y triseriados (Figura 48a, 48b). Sin embargo, estos tipos de radios se encuentran en muy bajas proporciones en el tejido de *Prosopis alba* en relación con los radios multiseriados, el cual mostró una correlación negativa y significativa ($r= -0,31$, $p=0,0124$) con la densidad básica (Figura 48c).

Investigaciones efectuadas por Zheng y Martínez-Cabrera (2013) sugiere que la función de los radios varía con su tamaño. Es decir, un área de radios elevada en especies con radios angostos, se asocia con una mayor resistencia mecánica, mientras que un área de radios elevada en especies de radios anchos se asocia más estrechamente con rasgos que confieren una mayor conductancia, esto podría explicar en parte las correlaciones entre el histograma de tipo de radios con la densidad de la madera.

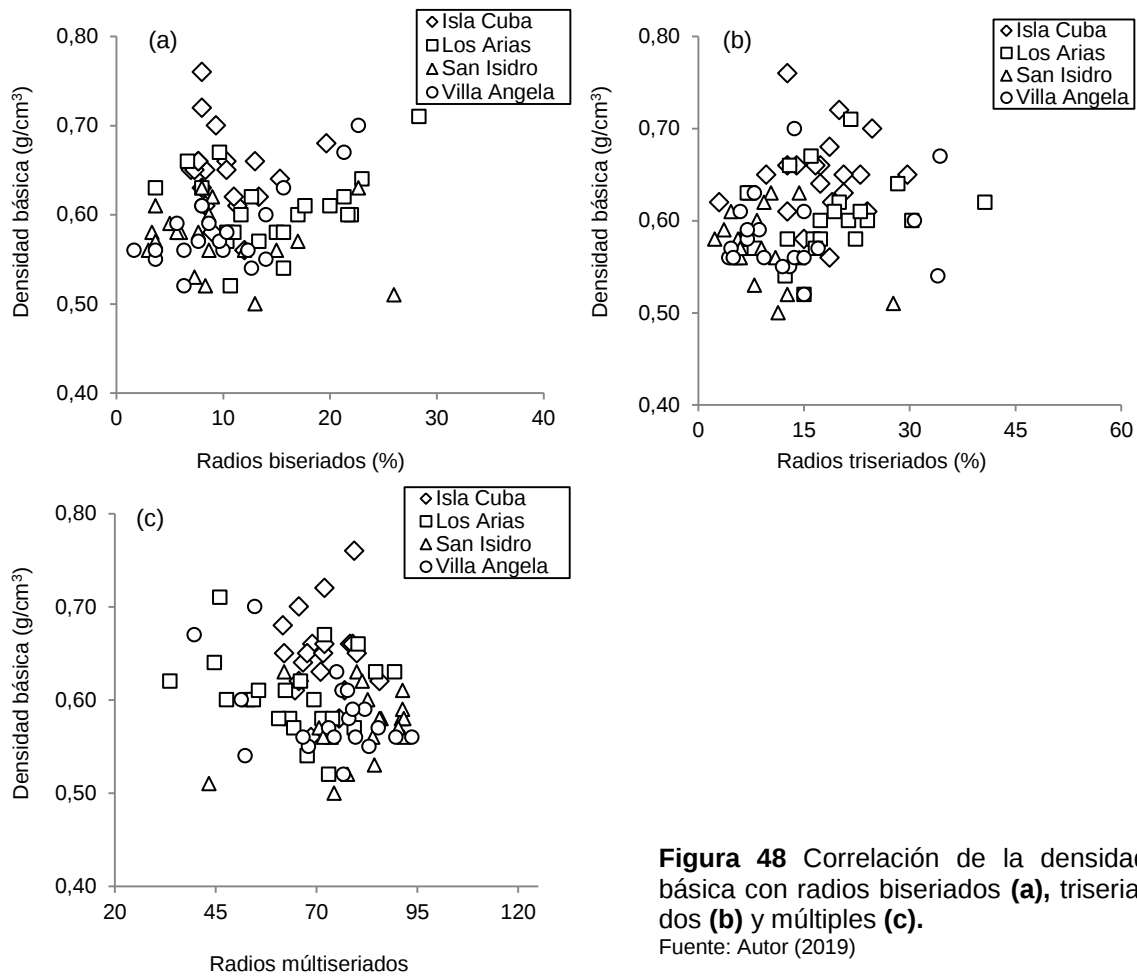


Figura 48 Correlación de la densidad básica con radios biseriados (a), triseriados (b) y múltiples (c).

Fuente: Autor (2019)

4.8.1. Consideraciones sobre la densidad y anatomía del leño

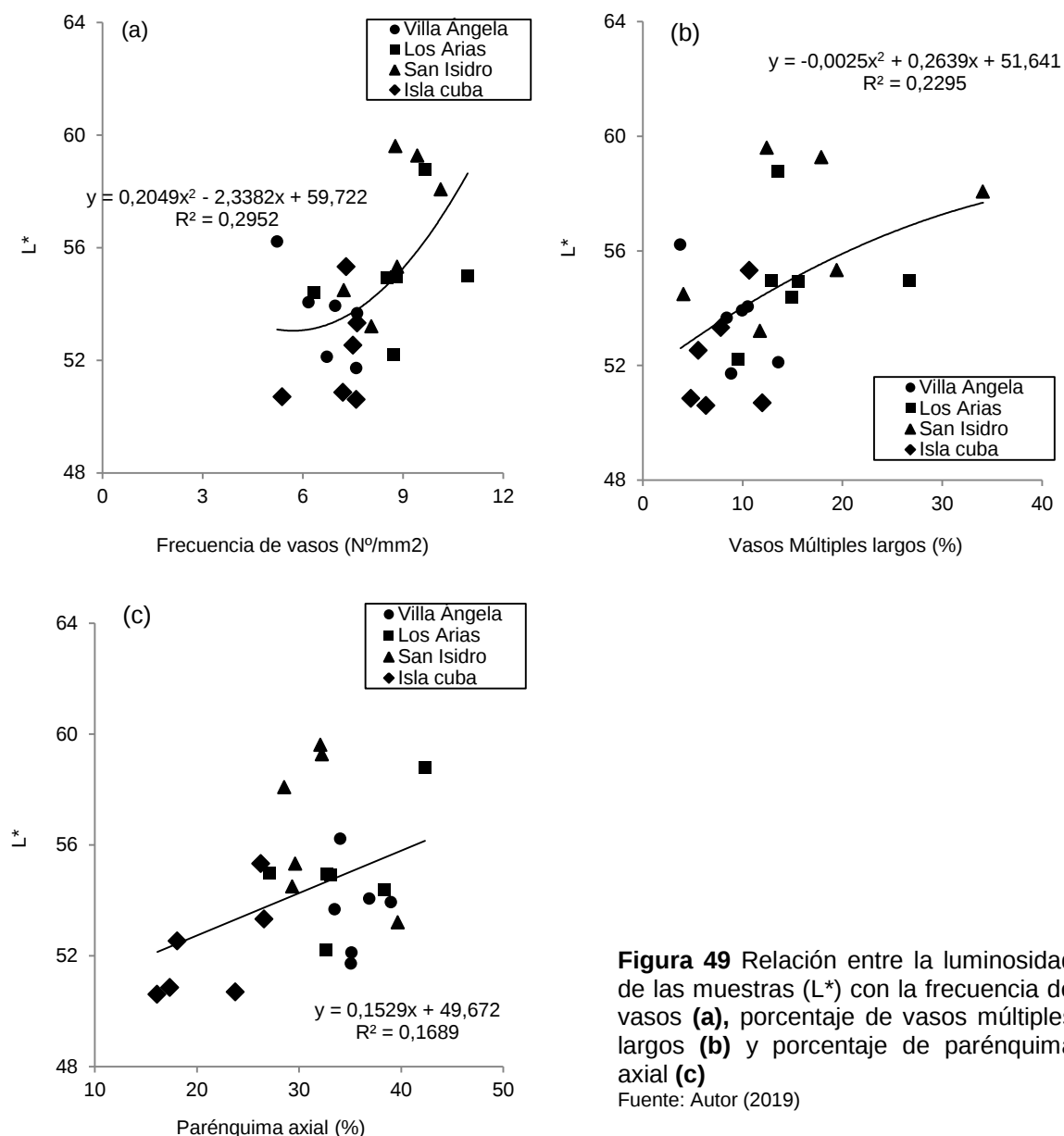
Como se pudo apreciar cambios en la densidad básica de la madera, van acompañados de cambios en las distintas características anatómicas, esta dendroplasticidad contribuye a predecir mejor los cambios en el comportamiento de la especie bajo diferentes escenarios del cambio global. En este contexto, el sitio más húmedo presentó características como paredes de fibras muy delgadas y altos porcentajes de parénquima axial y radial, generando maderas menos densas en relación con los sitios de mayor estrés ambiental. Numerosos estudios demuestran que los árboles de maderas mas livianas tienden a sufrir, durante eventos de sequía, una mayor mortalidad que árboles de maderas mas densas (Phillips *et al.* 2010, Condit *et al.* 1995,). Los árboles grandes también pueden sufrir una mortalidad elevada durante la sequía debido a la exposición a altas temperaturas y radiación (Phillips *et al.* 2010).

4.9. Correlación de la anatomía del leño con parámetros colorimétricos

La tabla 8 (ANEXO I) muestra que la luminosidad (L^*) se correlaciona positiva y significativamente con la frecuencia de vasos ($r= 0,51$, $p=0,01$), el porcentaje de parénquima axial ($r= 0,41$; $p= 0,05$) y el porcentaje de vasos múltiples largos ($r= 0,47$, $p= 0,02$) (Figura 49a, 49b, 49c). Esto indica que aumento de estos tejidos en el xilema de algarrobo blanco tienden a generar maderas más claras y luminosas.

Existen pocos estudios que relacionan la anatomía del leño con el color de la madera, Nishino *et al* (1998) sugiere que diferencias de color entre muestras de madera puede atribuirse a la diferencia de las características anatómicas como la disposición de las células, la existencia de radios anchos, los granos entrelazados, entre otros. Aportes más recientes efectuados por Möttönen (2005), mencionan que los productos químicos descoloridos en la madera están concentrados en células parenquimáticas, lo que podría explicar el hecho de tonalidades más clara, debido a la mayor proximidad entre las células. En base a los resultados obtenidos, una mayor entrada de luz, dado por una mayor frecuencia, número de vasos y mayor parénquima axial (%) aumentan los niveles de reflectancia en muestras de madera, por lo que genera madera con tonalidades más claras (mayor L^*).

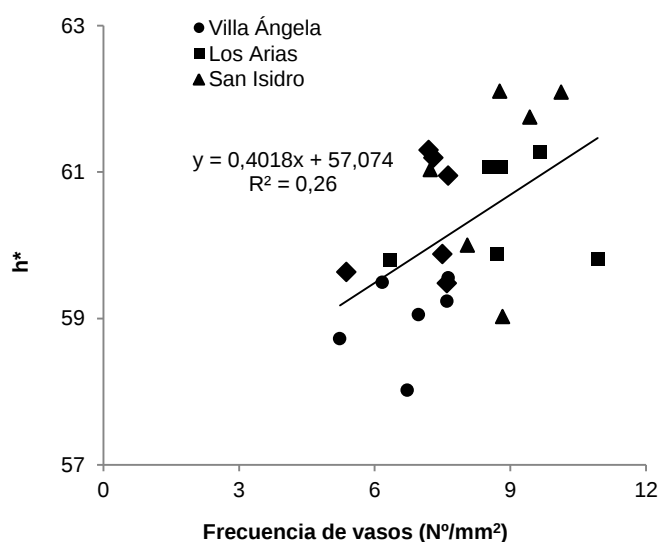
En las figuras 49a, 49b, es posible visualizar que árboles de los sitios de menor precipitación media anual (Los Arias y la plantación en San Isidro), son los que presentaron una mayor frecuencia de vasos y porcentaje de vasos múltiples largos, lo que generó muestras de maderas mucho más claras. Se observó un menor contenido de parénquima axial en el sitio de Isla Cuba (árido, de mayor temperatura media anual), donde la luminosidad de las muestras fueron las más oscura respecto a los demás sitios (Figura 49c).



Los parámetros a^* y b^* no se correlacionaron con ningún rasgo anatómico (Tabla 8, ANEXO 1). Sin embargo, el parámetro a^* siempre estuvo relacionado al contenido de extractivos, algo que requiere de estudios futuros. Investigaciones efectuados por Macedo (2002), en *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus cloeziana*, afirman que el pigmento rojo tiende a aumentar, a medida que el espesor de la pared celular aumenta (Xavier, 2008), y puede ser comprobado por la correlación positiva de la coordenada a^* con el espesor de la pared celular de las fibras. Sin embargo, en esta tesis la relación entre estas dos variables fue prácticamente nula.

El ángulo de tinta presentó correlaciones significativas y positivas con la frecuencia de vasos ($r= 0,51$; $p=0,03$) (Figura 50), es decir, que aumento en el ángulo de tono van acompañados de incrementos en la cantidad de vasos por mm^2 , indicando que maderas más claras para esta especie y en estos sitios analizados están asociados con aumentos de este tejido xilemático. Hiller *et al.* (1972) establece la relación entre el color del duramen de *Junglas nigra* con propiedades físicas y anatómicas de la madera, encontrando que la mejor regresión para estimar el porcentaje de luminosidad de la madera, es el número de vasos por mm^2 , área promedio de vaso, gravedad específica de la madera, gravedad específica del tejido fibroso, porcentaje de extractivos y ancho del anillo.

En este sentido, es importante tener en cuenta que el color varía en función de las condiciones de sitios, dado principalmente por variaciones en los rasgos anatómicos y las propiedades físicas (densidad básica). En el futuro podría ser factible controlar no solo el color, sino también las características de la madera mediante la manipulación de las prácticas de manejo forestal o elección de sitios, donde se tenga como premisa favorecer rasgos de interés.



5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente tesis, se emiten las siguientes conclusiones:

1. Existen diferencias significativas para el color entre sitios y dentro del árbol: la albura difiere del duramen y médula en luminosidad, pigmento amarillo, rojo, saturación y ángulo de tinta, estas diferencias son apreciables a muy apreciables. Los sitios más húmedos presentaron las maderas más oscuras y los más áridos maderas más claras.
2. La densidad básica no mostró diferencias significativas entre sitios, debido a la alta variabilidad entre árboles. Sin embargo, si lo fue la interacción *sitio x distancia*. El sitio de Isla Cuba, presentó valores de densidad básica asociados a mayor calidad en la parte externa del duramen, demostrando la importancia de las distancias a la médula.
3. La variabilidad entre sitios fue significativa para todas las características anatómicas con excepción del porcentaje de vasos solitarios en *Prosopis alba*. La variabilidad entre distancias, desde la médula, también fue significativa con ex-

cepción de la longitud de radios y proporción de fibras. Se observaron tendencias crecientes en dirección a la corteza de los siguientes rasgos: el diámetro de los vasos, el espesor de la pared de fibras, la longitud y ancho de radios, el porcentaje de vasos y radios, porcentaje de vasos múltiples largos y radios multiseriados. Mientras que la frecuencia de vasos y radios, porcentaje de parénquima axial, porcentaje de vasos solitarios y múltiples de 2-3, radios uni, bi y triseriados muestran tendencia decreciente.

4. En análisis de correlación del presente estudio muestra:

- El rasgo dendrométrico diámetro a la altura del pecho (DAP), fue el único que tuvo una correlación positiva con la densidad básica.
- Todos los parámetros colorimétricos estudiados tuvieron una correlación negativa con la densidad básica. Las maderas más densas, son más oscuras (menor L^*) y presentan menos coloración rojiza (a^*), amarillenta (b^*) y saturación (C).
- La densidad de la madera depende sobre todo de la estructura anatómica, ya que las características anatómicas: diámetro de vaso, longitud y ancho de radios, porcentaje de parénquima y radios, porcentaje de vasos múltiples largos y radios multiseriados mostraron correlaciones negativas y significativas con la densidad; mientras que la frecuencia de radios, el porcentaje de fibras, los radios bi y triseriados tuvieron correlaciones positivas y significativas con la densidad básica del xilema.

6. CONSIDERACIONES FINALES

- Estudios colorimétricos en especies de la región chaqueña, son claves para indicaciones uso.
- Realizar estudios de componentes químicos presentes en la madera de esta especie, para posibles aplicaciones industriales y productos nanotecnológicos.
- Estudios de preferencias de mercado relacionados al color de la madera nativa.
- Evaluar la potencialidad como rodal semillero al sitio de Isla Cuba, por presentar características asociadas a una mayor resistencia, bajo condiciones de estrés ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrahão, CP. 2005. Estimativa de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* por espectrometria. 182 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Alarcón P, Fernández ME, Monteoliva S, Martinez Meier A. 2016. Variación genética y plasticidad fenotípica de la microdensidad de la madera en dos especies de *Eucalyptus*: aportes para la selección de genotipos mejor adaptados al estrés ambiental. XXX Jor. Forest. de Entre Ríos, Concordia, Argentina.
- Antezana C, Atahuachi M, Arrázola S, Fernández E, Navarro G. 2000. Ecología y biogeografía del género *Prosopis* (Mimosaceae) en Bolivia. Rev. Bol. Ecol. 8 (1): 25 – 36.
- Araujo PA, Remacha Gete A, Medina JC, Taboada R. 2003. Los recursos maderables del Chaco semiárido Argentino: características, usos actuables y potenciales. Bol. de Inf. Téc. 224 (1): 50-53.
- Arce N, Moya R. 2015. Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica. Cerne 21(3): 353-362.
- Atayde CM, González JC, Camargos JAA. 2011. Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de muirapiranga (*Brosimum* sp.). Cerne 17(2): 231-235.
- Autran CS, González JC. 2006. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) visando à utilização em interiores. Ciência Florestal 16(4): 445-451.
- Baar J, Wimmer R, D'Amico S. 2014. Dependence of colour and discolouration on total extractive content of African Padauk and Jatoba. Wood Sci. Technol. 48: 1155–1165.
- Bárcenas P, Terrazas S, Dávalos SR, Honorato SJA. 2002. Efecto del contenido de lignina, extractivos, radios y densidad relativa o básica en las contracciones de cinco especies de madera. In: Memorias del IV Congreso Mexicano de Tecnología de Productos Forestales. 13 al 16 Nov., Guadalajara, México: 33-34.
- Beckwith JR. 1979. Theory and practice of hardwood colour measurement. J. Wood Sci. 11(3):169-175.
- Bianchi AR, Cravero SA. 2015. Atlas climático digital de la República Argentina. Inst. Nac. de Tec. Agrop. 56p.
- Bolzón de Muñiz GI, Nisgoski S, Lomelí-Ramírez MG. 2010. Anatomía y ultraestructura de la madera de tres especies de *Prosopis* (Leguminosae-Mimosoideae) del Parque Chaqueño seco, Argentina. Madera y Bosques 16(4): 21-38.
- Boudouaya M, Benhassaini H, Bendimered-Mouri FZ, Mothe F Fournier M. 2017. Evaluation de la variabilité de la couleur du bois de *Pistacia atlantica* Desf. du Nord de l'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques 330 (4): 23-35.
- Bradbury G. 2007. How is Wood quality affected by growth rate and silviculture?. In: Beadle, C.L. and Brown, A.G. (eds), *Acacia Utilisation and Management: Adding Value*. Rural Industries Research and Development Corporation p: 10-13.
- Bradbury GJ, Potts BM, Beadle CL. 2010. Quantifying phenotypic variation in wood colour in *Acacia melanoxylon* R.Br. Forestry 83(2):153–162.

- Bradbury GJ. 2005. A comparison of timber quality of blackwood grown in young swamp forest, fenced regeneration, and a plantation. *Tasforests* 16: 95–110.
- Bruniard E. 1978. El Gran Chaco Argentino (Ensayo de interpretación geográfica). *Rev. Inst. Geog.* 4: 1-259.
- Burgert I, Eckstein D. 2001. The tensile strength of isolated wood rays of beech (*Fagus sylvatica* L.) and its significance for the biomechanics of living trees. *Trees* 15: 168–170.
- Cámara de Diputados. 1996. Ley Nº 6277: Dirección de Protección de Recursos Naturales
- Camargos JAA, Gonçalves JC. 2001. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. *Brasil Florestal* 71: 30-41.
- Carlquist S, Hoekman DA. 1985. Ecological anatomy of the woody southern Californian flora. *IAWA Bull.* ns 6: 319-347.
- Carrillo-Parra, A. 2007. Technological investigation of *Prosopis laevigata* wood from Northeast México. Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Forest Sciences and Forest Ecology of de University of Göttingen. Göttingen, Germany. 137 p.
- Celis A. 2006. Desastres en la Región Litoral de Argentina: 1970-2004. *Pampa* 2: 85-109.
- Chave J, Coomes D, Jansen S, Lewis SL, Swenson NG, Zanne AE. 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecol. Letters* 12: 351–366.
- Chave J, Muller-Landau HC, Baker T, Easdale T, Ter Steege H, Webb CO. 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species. *Ecol. Appl.* 16(6): 2356–2367.
- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T.J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R. *et al.* 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491: 752–755.
- Cisneros AB, Moglia JG. 2017. *Prosopis alba*, alternativa sustentable para zonas áridas y semiáridas. In: Giménez AM., Moglia JG (ed). *Los Bosques actuales del Chaco semiárido argentino. ecoanatomía y biodiversidad. Una mirada propositiva*, p 231-248, 1 ed.- Córdoba: Encuentro Grupo Editor; Santiago del Estero: Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Cisneros AB, Moglia JG, González D. 2013. Caracteres macroscópicos de la madera de individuos selectos de *Prosopis alba* de diferentes sitios. IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del NOA. Disponible <<https://fcf.unse.edu.ar/archivos/publicaciones/codinoa-2013/trabajos/agropecuarias/10-cisneros.pdf>> [Consulta: Julio 2019]
- Climate explorer. <<https://climexp.knmi.nl/select.cgi>> [Consulta: Junio 2019]
- Condit, R, Hubbell SP, Foster RB. 1995. Mortality rates of 205 Neotropical tree and shrub species and the impact of severe drought. *Ecol. Monographs* 65:419-439.

- Congreso de la Nación Argentina, 1998. Ley 25.080 Ley de inversiones para bosques cultivados, <<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/55000-59999/55596/texact.htm>> [Consulta: Julio 2019]
- Cony MA. 1996. Genetic variability in *Prosopis flexuosa* D. C., a native tree of the Monte phytogeographic province, Argentina. For. Ecol. Manage 87:41–49.
- Corcuera L, Cochard H, Gil-Pelegrin E, Notivol E. 2011. Phenotypic plasticity in mesic populations of *Pinus pinaster* improves resistance to xylem embolism (P50) under severe drought. Trees 25 (6): 1033-1042
- Costa JA, Gonçalves JC, Camargos JAA, Gomes IAS. 2011. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*) Submetidas à radiação ultravioleta. Cerne 17(1): 133-139.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, 336 p.
- Di Rienzo JA, Macchiavelli RE, Casanoves F. 2011. Modelos lineales mixtos: aplicaciones en InfoStat / - 1a. ed. - Córdoba: Grupo Infostat, 253 p.
- Díaz G, Monteoliva S, Álvarez J, Fernández Tschieder E. 2010. *Populus deltoides* 'Australiano 129/60': variación axial de la densidad y desarrollo de un modelo predictivo de la densidad del árbol completo. Bosque 31 (1): 65-72.
- Barros SV, Bolzón de Muñiz GI, Monteiro de Matos JL. 2014. Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia. Cerne 20(3): 337-342.
- Fagg cw, Stewart JL. 1994. The value of *Acacia* and *Prosopis* in arid and semi-arid environments. J. of arid env. 27 (1): 3-25
- Ferreira M, Kageyama PY. 1994. Melhoramento Genético da Densidade da Madeira de *Eucalipto*. Anais do 3a Congresso Florestal Brasileiro. Vol. II 148-152.
- Forniture F. 2019. < <https://www.francofurniture.es/catalogos-franco-furniture/> > [Consulta: junio de 2019]
- Fujiwara S, Sameshima K, Kuroda K, Takamura N. 1991. Anatomy and properties of Japanese hardwoods. I. Variation of fibre dimensions and tissue proportions and their relation to basic density. IAWA Bull. ns 12:419–424.
- Galera F. 2000. Las especies del Género *Prosopis* (Algarrobos) de América Latina con especial énfasis en aquellas de interés económico. (Recompilación y Elaboración). Córdoba, Argentina. ISBN 987-43-2577-1. Disponible < <http://www.fao.org/3/ad314s/AD314S03.htm> >. [Consulta: Enero de 2019].
- Juárez de Galíndez M, Giménez AM, Ríos N, Balzarini M. 2007. Modelación del crecimiento en diámetro de vinal (*Prosopis ruscifolia*), en Santiago del Estero, Argentina. Foresta Veracruzana 9(2): 9-15.
- Garcia RA, Marinonio GB. 2016. Variação da cor da madeira de teca em função da densidade e do teor de extrativos. Floresta Ambient. 23(1): 24-134.
- Garcia RA, Silveira de Oliveira N, Do Nascimento AM, Dias De Souza N. 2014. Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. Cerne 20(4): 509-517.

- Gartner BL, Lei H, Milota MR. 1997. Variation in the anatomy and specific gravity of wood within and between trees of red alder (*Alnus rubra* Bong.). Wood and Fiber Sci. 29(1):10-20.
- Gierlinger N, Jacques D, Grabner M, Wimmer R, Schwanninger M, Rozenberg F, Pâques LE. 2004. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. Trees 18: 102–108.
- Giménez AM, Hernández P, Gerez R, Ríos N. 2007. Diversidad vegetal en siete unidades demostrativas del Chaco semiárido argentino. Maderas y Bosques 13(1): 61-78.
- Giménez AM, López C. 2002. Variación longitudinal de los elementos del leño en *Schinopsis quebracho-colorado* (Schlecht.) Barkl. et Meyer Anacardiaceae. Madera y Bosques 8(2):27-38.
- Giménez AM, Moglia JG. 2003. Árboles del chaco argentino: guía para el reconocimiento dendrológico. El Liberal S.R.L Ed. Santiago del Estero Argentina. 307 p.
- Giménez AM, Moglia JG. 2017. Ecoanatomía del xilema secundario de las leñosas arbóreas del chaco argentino, variables cuantitativas. In: Giménez AM, Moglia JG (Ed). Los Bosques actuales del Chaco semiárido argentino. Ecoanatomía y biodiversidad. Una mirada propositiva p.231-248. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina.
- Giménez AM, Ríos N, J Moglia JG, López C. 1998. Leño y corteza de *Prosopis alba* Griseb., algarrobo blanco, Mimosaceae, en relación con algunas magnitudes dendrométricas. Bosque 19(2): 53-62.
- Giménez AM, Ríos N, J Moglia JG, Hernández P, Bravo S. 2001. Estudio de magnitudes dendrométricas en función de la edad en *Prosopis alba* Griseb., algarrobo blanco, Mimosaceae. Forest. Venez. 45(2): 175-183.
- Giménez AM, Ríos N, J Moglia JG. 2000. Relación albura-duramen en tres especies arbóreas de la región chaqueña seca. Quebracho 8: 56-63.
- Giménez AM. 2000. Gradiente radial de los elementos anatómicos del leño en *Schinopsis quebracho-colorado* (Schlecht.) Barkl. et Meyer, Anacardiaceae. Bosque 21(2): 37-45
- Gonçalez JC. 1993. Caracterisation technologique de quatre espèces peu connues de la forêt Amazonienne: anatomie, chimie, couleur, propriétés physiques et mécaniques. 1993. 446 p. Thèse (Doctorat) - ENGREF, Nancy.
- Gonçalez JC, Janin G, Santoro ACS, Costa AF, Valle AT. 2001. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. Brasil Florestal. 72: 47-58.
- Gómez A, Salim N, Gómez C. 2020. Algarrobo blanco, “el árbol” y los servicios ecosistémicos. Hoja Informativa N° 20. INTA Sgo del Estero. ISSN 2545-7195.
- Griebeler C. 2013. Colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis* w.hill ex maiden modificada térmicamente. Mestre em Engenharia Florestal. Setor de Ciencias Agrarias da Universidade Federal do Parana, Curitiba, Brasil. 69p.
- Guitard D, El-amri F. 1987. La fraction volumique en rayons ligneux comme paramètre explicatif de la variabilité de l'anisotropie élastique du matériau bois. Actes du 2e Colloque des Sciences et Industries du Bois, 22–24 April 1987, Nancy, France.
- Hacke UG, Sperry JS. 2001. Functional and ecological xylem anatomy. Perspectives in Plant Ecol-

- ogy, Evolution and systematics 4(2): 97–115.
- Hacke UG, Sperry JS, Pockman WT, Davis SD, McCulloh KA. 2001. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. *Oecologia*, 126:457–461
- Hikita Y, Toyoda T, Azuma M. 2001. Weathering testing of timber – discoloration. In: IMAMURA, Y. High performance utilization of wood for outdoor uses. Kyoto, Japao: Press-net.
- Hiller CH, Freese F, Smith DM. 1972. Relationships in black walnut heartwood between colour and other physical and anatomical characteristics. *Wood fiber* 4:38–42.
- Holt D, Murphey W. 1978. Properties of hybrid poplar juvenile wood affected by silvicultural treatments. *J. Wood Sci.*,10(4):198-203.
- Hon DNS, Shiraishi N. 2001. Color and discoloration. In: Hon DNS, Minemura N (eds) *Wood and Cellulosic chemistry*, 2nd edn. Marcel Dekker, Basel, pp 385–442.
- Hueck K. 1966. Los bosques de sudamérica. Stuttgart. G. Fischer. 422 p.
- Igartúa D, Monteoliva S. 2010. Densidad básica, longitud de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en Argentina. *Bosque* 31(2): 150-156.
- Igartúa DV, Moreno K, Piter JC, Monteoliva S. 2015. Densidad y propiedades mecánicas de la madera de *Acacia melanoxylon* implantada en argentina. *Maderas, ciencia y tecnología* 17(4): 809 – 820
- Igartúa DV; Monteoliva S; Piter JC. 2009. Estudio de algunas propiedades físicas de la madera de *Acacia melanoxylon* en Argentina. *Maderas, ciencia y tecnología* 11(1): 3-18.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). 2018. Maderas Argentinas | Caracterización de maderas nativas y comerciales argentinas. <https://www.inti.gob.ar/maderaymuebles/index.php?seccion=maderasnativas> <Visito Agosto de 2018>.
- IRAM 9544. “Norma para métodos de determinación de densidad aparente en maderas”. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 6p. (1973).
- Jacobsen AL, Agenbag L, Esler KJ, Brandon Pratt R, Ewers FW, Davis SD. 2007. Xylem density, biomechanics and anatomical traits correlate with water stress in 17 evergreen shrub species of the Mediterranean-type climate region of South Africa. *J. of Ecology* 95: 171–183.
- Jacobsen AL, Pratt RB, Ewers FW, Davis SD. 2006. Cavitation resistance among twenty-two chaparral species of southern California. *Ecological Monographs*, in press.
- Jobbágy EG, Noretto MD, Villagra PE, Jackson RB. 2011. Water subsidies from mountains to deserts: their role in sustaining groundwater-fed oases in a sandy landscape. *Ecological applications* 21(3): 678–694.
- Karlin U, Brostein G. 1986. Caracterización de los sistemas de producción del árido subtropical argentino. In: V reunión de intercambio tecnológico en zonas áridas y semiáridas, 5. La Rioja: Orientación Gráfica Editora. p. 439-448.
- Leal S, Pereira H, Michael Grabner M, Wimmer R. 2003. Clonal and site variation of vessels in 7-year-old *Eucalyptus globulus*. *IAWA Journal*, 24 (2): 185–195

- Lei H, Gartner BL, Milota MR. 1997. Effect of growth rate on the anatomy, specific gravity, and bending properties of wood from 7-year-old red alder (*Alnus rubra*). Can. J. For. Res. 27: 80-85.
- León WJ. 2005. Anatomía ecológica del xilema secundario de un bosque seco tropical de Venezuela. Acta Bot. Venez. 28 (2): 257-274.
- López LC. 2009. Controle Metodológico da cor aplicado à estamperia digital de materiais têxteis. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 11 de setembro de 2009
- Lindorf H. 1994. Eco-anatomical wood features of species from a very dry tropical forest. IAWA Journal, 15 (4): 361-376.
- Liu S, Loup C, Gril J, Dumonceaud O, Thibaut A, Thibaut B. 2005 Studies on European beech (*Fagus sylvatica* L.). Part 1: variations of wood colour parameters. Ann. For. Sci. 62: 625–632.
- López AJ. 2014. Variación del color de la madera de *Eucalyptus dunnii* Maiden. In: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (ed), VI Reunión GEMFO, Trabajos Técnicos, Grupo de Genética y Mejoramiento Forestal p18-21.
- López C. 2004. Variación genética en procedencias y progenies de *Eucalyptus camaldulensis* introducidas en el noroeste argentino. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, España. 100 p.
- López C. 2005. Evaluación de la Variación Genética de Especies del Género *Prosopis* de la Región Chaqueña Argentina para su Conservación y Mejoramiento. In: Carlos Norberto (ed), Mejores Árboles para más Forestadores, pag: 195-203. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca Buenos Aires. ISBN: 9879184475.
- Lourenço A, Baptista I, Gominho J, Pereira H. 2008 The influence of heartwood on the pulping properties of *Acacia melanoxylon* wood. J. Wood Sci. 54, 464–469.
- McDonald E, Hubert J. 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. Forestry 75 (2):107–138.
- McDonald SS, Williamson GB, Wiemann MC. 1995. Wood specific gravity and anatomy in *Helio-carpus appendiculatus* (Tiliaceae). American Journal of Botany 82(7): 855-861.
- Macedo, DG. 2002. Aspecto mercadológico da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana* para a indústria moveleira. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 57 p.
- Martínez Meier A, Sánchez L, Pastorino M, Gallo L, Rozenberg P. 2008. What is hot in tree rings? The wood density of surviving Douglas-firs to the 2003 drought and heat wave. For. Ecol. Manage. 256 (4): 837–843.
- Martínez-Cabrera HI, Jones CS, Espino S, Schenk HJ. 2009. Wood anatomy and wood density in shrubs: responses to varying aridity along transcontinental transects. American Journal of Botany 96(8): 1388–1398.
- Mazet JF, Janin G. 1990. La qualité de l'aspect des placages de Chênes (*Quercus petraea* and *Quercus robur*): mesures de couleur et critères de d'appréciation des professionnels français et italiens. Ann. For. Sci. 47: 255–268.

- Meints T, Teischinger A, Stingl R, Hansmann C. 2017. Wood colour of central European wood species: CIELab characterisation and colour intensification. *Eur. J. Wood Prod.* 75:499–509
- Meloni DA, Gulotta MR, Martínez CA, Oliva MA. The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycinebetaine accumulation in *Prosopis alba*. *Braz. J. Plant Physiol.*, 16(1):39-46.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca. 2013. Creación del Programa Nacional del Algarrobo. Resol. 244/2013. Disponible: <<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFFpbmxjb21pc2lvbm5hY2lvbmFsZGVsYWxnYXJyb2JvfGd4OjM4NjFiNjFiNjJhZWNIYmM>> [Consulta: Julio 2018]
- Ministerio de Hacienda. 2019. Informes de cadena de valor: Forestal, papel y muebles Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_cadenas_de_valor_forestal_papel_muebles.pdf> [Consulta: Abril 2020]
- Moglia JG, Giménez AM. 1998. Rasgos anatómicos característicos del hidrosistema de las principales especies arbóreas de la Región Chaqueña Argentina. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* 7 (1): 7: 53-71.
- Moglia JG, González D, Cisneros AB, Giménez AM, Pan E, López Launstein D. 2016. Evaluación de la calidad de madera de *Prosopis alba* en rodales semilleros, PIA 10050. In: *Investigación Forestal 2011- 2015 Los Proyectos de Investigación Aplicada*. 1 ed. – Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Agroindustrias, Unidad para el Cambio Rural, Proyecto Forestal BIRF 7520 AR-GEF 090118.
- Moglia JG, López C. 2001. Variabilidad radial de algunos caracteres anatómicos de *Aspidosperma quebracho blanco*. *Bosque* 22 (2): 3-14.
- Montaño-Arias SA, Camargo-Ricalde SL, Pérez-Olvera CP. 2013. Ecoanatomía de los elementos de vaso de la madera de cinco especies del género *Mimosa* (Leguminosae-Mimosoideae). *Botanical Sciences* 91 (1): 1-10.
- Monteoliva S, Barotto AJ, Alarcón P, Tesón N, Fernández ME. 2017. Densidad de la madera como variable integradora de la anatomía del leño: análisis de ramas y fuste en cuatro especies de *Eucalyptus*. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. 116 (1): 1-11.
- Monteoliva S, Igartúa DV, Matta EJ. 2009. Color de la madera de *Acacia melanoxylon*: aplicación del sistema CIE. *Bosque* 30 (3): 192-197.
- Lima, JT, Mori FA, Goncalvez JC, Oliveira Mori CLS. 2005. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. *Cerne* 11(2): 137-146
- Möttönen V. 2005. Variation of color and selected physical and mechanical properties related to artificial drying of sawn silver birch (*Betula pendula* Benth) timber from plantations. 2005. 43 p. Dissertations (Mesters in Forestales) - Faculty of Forestry, University of Joensuu.
- Moya R y Calvo-Alvarado J. 2012. Variation of wood color parameters of *Tectona grandis* and its relationship with physical environmental factors. *Ann. For. Sci.* 69: 947–959.
- Moya R, Berrocal A. 2010. Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. *Ann. For. Sci.* 67(109): 1-9.

- Moya R, Fallas RS, Bonilla PJ, Carolina T. 2012. Relationship between wood color parameters measured by the CIELab system and extractive and phenol content in *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* from fast-growth plantations. *Molecules* 17: 3639-3652.
- Moya R, Marín JD. 2011. Grouping of *Tectona grandis* (L.f.) clones using wood color and stiffness. *New Forests* 42: 329–345.
- Nicholas I, Dungey H, Gifford H, Cox J, Hodgkiss P, Jones T. 2007. Preliminary analysis of the wood properties of *Acacia melanoxylon* thinnings from five north Island regime trials in New Zealand. *Acacia Utilisation and Management – Adding value*. Rural Industries Research and Development Corporation. Canberra. p: 14-20.
- Nicholas, I.D., Young, G.D. and Gifford, H.H. 1994. Wood properties of *Acacia melanoxylon*: variation within and between four seedlots. In: *Faces of Farm Forestry*. Proceedings of the Australian Forest Growers Conference, Launceston, Tasmania. Australian Forest Growers, Canberra, p: 105–110.
- Nisgoski S. 2005. Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de *Pinus taeda* L. Tese doutorado. Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil. 173 p.
- Nishino Y, Janin G, Yamada Y, Kitano D. 2000. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. *J. Wood Sci.* 46: 267-272.
- Nishino, Y.; Janin, G.; Chanson B.; Gril, J. ; Thibaut, B. 1998. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. *J. Wood Sci.* 44: 3-8.
- Orellana JBP. 2015. Valorização tecnológica da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente plantios de dois sítios distintos localizados no estado do Amapá. Dissertação de Mestrado, Publicação PPG EFL. DM-256/2015, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF, 74p.
- Phillips OL, Van Der Heijden G, Lewis SL, Gabriela López-González G *et al.* 2010. Drought–mortality relationships for tropical forests. *New Phytologist* 187: 631–646
- Pometti CL, Pizzo B. , Brunetti M., Macchioni N., Ewens M, Saidman B. O. 2009. Argentinean native wood species: physical and mechanical characterization of some *Prosopis* species and *Acacia aroma* (Leguminosae; Mimosoideae) *Bioresource Technology* 100 (1): 1999–2004.
- Ponce RH. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas.1995. In:
- Poorter L, McDonald I, Alarcón A, Fichtler E, Licona J, Peña-Claros M, Sterck F, Villegas Z, Sass-Klaassen U. 2010. The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist* 185:481–492.
- Pratt RB, Jacobsen AL, Ewers FW, Davis SD. Relationships among xylem transport, biomechanics and storage in stems and roots of nine Rhamnaceae species of the California chaparral. *New Phytologist* 174: 787–798.
- Preston KA, Cornwell WK, Denoyer J. 2006. Wood density and vessel traits as distinct correlates of ecological strategy in 51 California coast range angiosperms. *New Phytologist* 170: 807–818.
- PIARFON. 2005. Caracterización del Chaco. In: *Propuesta de Manejo Sustentable de Montes ex-*

- plotados del Chaco Semiárido. Tomo I. Santiago del Estero: Proyecto de Bosques Nativos y Áreas Protegidas BIRF 4085 AR. 2005. Santiago del Estero, Argentina.
- Amorim PG, Gonçalves JC, Camargos JAA. 2013. Propiedades da madeira de *Pinus caribaea* y *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetría. *Cerne* 19(3): 461-466.
- Rink, G. 1987. Heartwood color and quantity variation in Young black walnut progeny test. *Wood Fiber and Sci.* 19: 93-100.
- Robert EMR, Koedam N, Beeckman H, Schmitz N. 2009. A safe hydraulic architecture as wood anatomical explanation for the difference in distribution of the mangroves *Avicennia* and *Rhizophora*. *Functional Ecology*. 23: 649–657.
- Rodríguez Anda R, Ramírez Arango AM, Palacios Juárez H, Fuentes Talavera FJ, Silva Guzmán JA, Saucedo Corona AR. 2015. Anatomical, physical-mechanical and machining characteristics of the wood of velvet mesquite (*Prosopis velutina* Wooton). *Rev. Mexicana de Cs Forestales* 6 (28): 156-173
- Romagnoli M, Segoloni E, Luna M, Margaritelli A, Gatti M, Santamaria U, Vinciguerra V. 2013. Wood colour in Lapacho (*Tabebuia serratifolia*): chemical composition and industrial implications. *Wood Sci. Technol.* 47(4): 701-716.
- Rossi FC. 2014. Crecimiento de ejemplares juveniles de *Prosopis alba* Griseb. en plantaciones del Chaco Semiárido argentino. Tesis vocacional de grado. Facultad de Cs. Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Santos JX. 2018. Características anatômicas e espectroscopia VIS/NIR na discriminação das espécies comercializadas como “tauari” na amazônia brasileira Argentina. Tesis de maestrado. Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil.
- Secretaria de Agroindustrias. 2019. LEY Nº 25.080 - PAGOS 2000 – 2019. Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial. Disponible en: <[https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/estadisticas/archivos/000000_Promoci%C3%B3n%20de%20Plantaci%C3%B3n/190000_Montos%20superficie%20forestadores%20tareass%20y%20planes%202000-2019%20\(15-03-2019\).pdf](https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/estadisticas/archivos/000000_Promoci%C3%B3n%20de%20Plantaci%C3%B3n/190000_Montos%20superficie%20forestadores%20tareass%20y%20planes%202000-2019%20(15-03-2019).pdf)> [Acceso en: 27 de Junio 2019].
- Seminario Internacional de Utilizacao de Madeira de Eucalipto para Serraria 1995, Sao Paulo, IPT, IPEF. p.50-58. Sao Paulo. Anais.
- Senisterra G, Ducid MG, Marlats RM. 2005. Variación de la densidad básica de la madera en clones del genero *Populus*. 3er Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Corrientes, Argentina. 8 p.
- Silva E, Stangerlin DM, Gatto DA, Calegari L, Pariz E. 2015. Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Ciência da Madeira* 6(1): 31-37.
- Silva RA, Setter C, Silva Mazette S, De Melo RR, Stangerlin D. 2017. Colorimetria da madeira de trinta espécies tropicais. *Ciência da Madeira* 8(1): 36-41.
- Sotelo Montes C, Weber JC, Garcia RA, Silva D A, and Bolzón Muñiz GI. 2013. Variation in wood color among natural populations of five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. *Can. J. For. Res.* 43: 552–562.
- Sotelo Montes C, Weber JC. 2009. Genetic variation in wood density and correlations with tree

- growth in *Prosopis africana* from Burkina Faso and Niger. *Ann. For. Sci.* 66 (7): 713.
- Sotelo Montes C; Hernández R; Beaulieu J; Weber J. 2008. Genetic variation in wood color and its correlations with tree growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the Peruvian Amazon. *New Forests* 35: 57–73.
- Sperry, J.S., Meinzer, F.C. & McCulloh, K.A. 2008. Safety and efficiency conflicts in hydraulic architecture: scaling from tissues to trees. *Plant Cell Environ.*, 31: 632–645.
- Swenson N, Enquist BJ. 2007. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: Wood density and its community-wide variation across latitude and elevation. *American Journal of Botany* 94(3): 451–459.
- Tasmanian Timber Promotion Board. 2006 Grades of Black-wood. <http://www.tastimber.tas.gov.au/Species/pdfs/Blackwood_Grades.pdf> [Acceso 3 Julio, 2017).
- Thomas DS, Montagub KD, Conroy JP. 2004. Changes in wood density of *Eucalyptus camaldulensis* due to temperature—the physiological link between water viscosity and wood anatomy. *For. Ecol. and Manage.* 193 (2004): 157–165.
- The Nature Conservancy (TNC) et. al 2005. Evaluación Ecorregional del Gran Chaco Americano. ISBN 950-9427-12-8.
- Thulasidas PK, Bhat KM, Okuyama T. 2006. Heartwood colour variation in home garden teak (*Tectona grandis*) from wet and dry localities of Kerala, India. *J. of Tropical Forest Science* 18(1): 51-54.
- Tortorelli LA. 2009. Maderas y bosques argentinos. 2da edición. Editorial: Orientacion Grafica, Buenos Aires.. ISBN 978-987-9260-69-2. Vol 1, 576p
- Turc C. and B. Cutter. 1984. Sorption and shrinkage studies of six argentine woods. *Wood and Fiber Sci.* 16(4): 575-582.
- Tyree MT, Zimmermann MH. 2002. Xylem structure and the ascent of sap. Springer, Berlin, Germany.
- Tsuchiya R, Furukawa I. 2009. Radial variation of vessel lumen diameter in relation to stem increment in 30 hardwood species. *IAWA Journal*, 30 (3): 331–342.
- Vanclay JK, Henson M, Palmer G. 2008. Colour variation and correlations in *Eucalyptus dunnii* sawnwood. *J. Wood Sci.* 54(6): 431-435.
- Veenin T, Fujita M, Nobuchi T, Siripatanadilok S. 2005. Radial variations of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. *IAWA Journal*, 26 (3): 353–361
- Verga A. 1995, “Genetische Untersuchungen an *Prosopis chilensis* und *P. flexuosa* (Mimosaceae) im trockenen Chaco Argentiniens. Göttingen Research Notes in Forest Genetics. Abteilung für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung der Universität Göttingen ISSN 0940-7103, Nro. 19, 96 pp.
- Verga A. 2005. Recursos genéticos, mejoramiento y conservación de especies del género *prosopis*. In: Carlos Norberto (ed), *Mejores Árboles para más Forestadores*, pag: 205-221. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca Buenos Aires. ISBN: 9879184475.

- Verga A, NavallM, Joseau J, Royo O, Degano W. 2009. Caracterización morfológica, distribución geográfica y estimación de nichos ecológicos de algarrobos (*Prosopis* sp.) en las regiones fitogeográficas chaqueña y espinal norte de Argentina. *Quebracho*. 17: 31-40.
- Villagra PE, Roig JFA. 1997. Wood structure of *Prosopis alpataco* and *P. argentina* growing under different edaphic conditions. *IAWA Journal* 180 (1): 37-51
- Villagra PE, Vilela A, Giordano C, and Álvarez JA. 2010. Ecophysiology of *Prosopis* Species From the Arid Lands of Argentina: What Do We Know About Adaptation to Stressful Environments?. In: Ramawat KG (ed) *Desert plants Biology and Biotechnology*, pag 322-336. Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- Villagra PE. 2000. Aspectos ecológicos de los algarrobales argentinos. *Multequina* 9(2): 35-51.
- Villegas MS, Área MC. 2009. Caracterización de la madera de *Salix* 2: Relaciones entre propiedades ópticas y otros atributos del leño. *Invest. Agraria: Sist. y Rec. Forest.* 18(2), 204-212.
- Villegas MS. 2009. Colorimetría y blancura en la madera de *Salix*. <<https://studylib.es/doc/5172289/colorimetr%C3%ADa-y-blancura-en-madera-de-salix-villegas--m.s....>> [Consulta: 30 de noviembre de 2018]
- Visor GeoINTA. Atlas Climático. < <http://visor.geointa.inta.gob.ar/?p=79> > [Consulta: 27 de marzo de 2018]
- Voss DH, Hale WN. 1998. A comparison of the three editions of the Royal Horticultural Society Colour Chart. *HortScience* 33:13-17
- Wheeler E, Bass P, Gasson PE. 1989. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. 1989. *IAWA Bull.* 10 (3): 219-332.
- Winck AR, Fassola HE, Barth SR, Keller AE, Crechi EH. 2014. Densidad básica de *Eucalyptus grandis* H para diferentes edades y zonas agroecológicas de la región mesopotámica. <
https://www.researchgate.net/profile/Rosa_Angela/publication/280554923_XVI_Jornadas_Tecnicas_Forestales_y_Ambientales_-_Silvicultura_DENSIDAD_BASIC_A_DE_Eucalyptus_grandis_H_PARA_DIFERENTES_EDADES_Y_ZONAS_AGROECOLOGICAS_DE_LA_REGION_MESOPOTAMICA_BASIC_DENSITY_OF_Eucalyptu/links/55b8ca6e08aec0e5f43b7919.pdf>. [Consulta: 29 de Julio de 2019]
- Winck AR. 2013. Influencia del raleo sobre las características anatómicas y las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* L. de la región NE de la Argentina. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Misiones. 102 p.
- Xavier RBL. 2008. Avaliação da dureza Janka, densidade e estabilidade de quatro espécies de *Eucalyptus* implantadas no Estado do Rio de Janeiro. 2008. 31 p. Monografía (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- Zanne AE, Westoby M, Falster DS, Ackerly DD, Loarie SR, Arnold SEJ, Coomes DA. 2010. Angiosperm wood structure: global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. *American Journal of Botany* 97(2): 207-215.
- Zheng J, Martínez-Cabrera HI. 2013. Wood anatomical correlates with theoretical conductivity and

wood density across China: evolutionary evidence of the functional differentiation of axial and radial parenchyma. *Ann. of Botany* 112: 927–935.

Zieminska K, Butler DW, Gleason SM, Wright IJ, Westoby M. 2013. Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. *AoB Plants* 5: 1-14

Zimmermann MH. 1983. Xylem structure and the ascent of sap. New York, NY, USA: Springer-Verlag.

ANEXO I

Tabla 1 Valores medios de los parámetros colorimétricos de las muestras de *Prosopis alba* griseb. en los 3 rodales semilleros y la plantación según la region de la muestra.

Región	Sitio	n	L*		a*		b*		C		h	
			Media	CV%	Media	CV%	Media	CV%	Media	CV%	Media	CV%
	Isla Cuba	120	68,84	11,19	5,28	33,83	29,25	18,24	29,8	17,35	79,39	5,65
	Los Arias	120	69,56	9,81	5,71	36,33	30,46	19,82	31,1	18,74	78,88	6,27
	Albura	120	69,71	10,99	6,76	34,91	25,07	13,28	26,1	11,99	74,67	7,71
	Villa Ángela	120	60,93	12,14	7,77	22,85	23,89	17,37	25,22	15,56	71,58	7,00
	Total	480	67,26	11,03	6,38	31,98	27,17	17,18	28,06	15,91	76,13	6,66
	Isla Cuba	480	52,22	8,36	9,5	13,11	16,75	12,85	19,26	12,51	60,41	3,01
	Los Arias	480	55,04	7,30	10,6	8,87	18,76	9,73	21,55	9,05	60,48	2,86
	Duramen	480	56,66	7,45	9,87	9,46	17,86	10,39	20,41	9,56	61,00	3,37
	Villa Ángela	480	53,62	7,56	10,25	11,87	17,09	12,34	19,94	11,93	59,01	2,53
	Total	1920	54,39	7,67	10,06	10,83	17,62	11,33	20,29	10,76	60,23	2,94
	Isla Cuba	120	52,69	7,47	9,76	12,07	17,52	12,69	20,07	12,27	60,83	2,52
	Los Arias	120	55,19	7,7	10,37	7,14	18,5	9,65	21,22	8,75	60,67	2,42
	Médula	120	57,75	7,01	10,34	9,25	19,22	8,7	21,83	8,38	61,69	2,57
	Villa Ángela	120	53,68	7,02	10,44	11,7	16,58	14,88	19,61	13,49	57,65	3,87
	Total	480	54,83	7,30	10,23	10,04	17,96	11,48	20,68	10,72	60,21	2,85

Tabla 2. Resultados del análisis del color en la madera de 24 árboles de *Prosopis alba* que crecen en sitios diferentes en la Región Chaqueña, Argentina (N = 144).

Fuente de variación	Parámetro colorimétrico				
	Media- L*	Media- a*	Media- b*	Media- C	Media-h
Sitio	0,0009	0,0079	0,0041	NS	<0,0001
Sección	<0,0001	<0,0001	NS	NS	NS
Región	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Sitio:Sección	NS	NS	NS	NS	NS
Sitio:Región	0,0081	0,0043	0,0007	0,0026	<0,0001
Sección:Región	0,0004	0,0012	NS	NS	<0,0001
Sitio:Sección:Región	NS	NS	NS	NS	NS

Tabla 3. Componentes de varianza

Parámetros colorimétrico	Componente	Varianza estimada	Variabilidad relativa al total (%)
L*	Árbol	1,7424	5,56
	Residual	29,5936	94,44
a*	Árbol	0,1681	8,80
	Residual	1,7424	91,20
b*	Árbol	0,7744	4,34
	Residual	17,0569	95,66
C	Árbol	0,8836	5,33
	Residual	15,6816	94,67
h	Árbol	0,4624	3,35
	Residual	13,3225	96,65

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Pearson para la relación entre los parámetros del color en árboles de *Prosopis alba*.

		Albura					Duramen				
		L*	a*	b*	C	h	L*	a*	b*	C	h
Albura	L*	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	a*	-0,73**	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	b*	0,68**	-0,55**	1	-	-	-	-	-	-	-
	C	0,63**	-0,47**	0,99**	1	-	-	-	-	-	-
	h	0,81**	-0,95**	0,77**	0,71**	1	-	-	-	-	-
Duramen	L*	0,17NS	0,25 NS	-0,01 NS	0,02 NS	-0,18 NS	1	-	-	-	-
	a*	0,07 NS	-0,09 NS	-0,05 NS	-0,06 NS	0,03 NS	0,22NS	1	-	-	-
	b*	0,24 NS	-0,06 NS	0,03 NS	0,02 NS	0,05 NS	0,61**	0,81**	1	-	-
	C	0,21 NS	-0,07 NS	0,01 NS	0,003 NS	0,05 NS	0,53**	0,89**	0,99**	1	-
	h	0,27 NS	0,04 NS	0,12 NS	0,13 NS	0,035 NS	0,67**	-0,26 NS	0,36*	0,22 NS	1

NS no difiere estadísticamente; ** estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 99%; * estadísticamente significativo a un nivel de confianza del 95%

Tabla 5. Pruebas de hipótesis marginales suma de cuadrados Tipo III del modelo lineal mixto para densidad básica

Fuente de variación	F-value	p-value
(Intercept)	6243,65	<0,0001
Sitio	4,09	0,02
Distancia	0,57	0,64
Sitio: Distancia	2,77	0,01

Tabla 6. Resultados del ANOVA aplicados a las características anatómicas estudiadas en *Prosopis alba*.

	Fuente de Variación	Sitio	Distancia	Sitio x Distancia
Vasos	Diám vaso (μm)	**	**	NS
	Frec. vaso ($\text{N}^\circ/\text{mm}^2$)	**	**	-
Fibras	Espesor pared (μm)	**	**	**
	Longitud de radio (μm)	**	NS	NS
Radios	Ancho de radio (μm)	**	**	**
	Radios/mm lineal	**	**	
	Vasos (%)	**	**	**
Proporción de tejidos	Parénquima (%)	**	**	**
	Fibras (%)	**	NS	**
	Radios (%)	**	**	**
	Solitarios (%)	NS	**	NS
Tipo de vasos	Múltiples (2,3) (%)	**	**	NS
	Múltiples Largos (%)	**	**	NS
	Uniseriado (%)	**	**	NS
Tipos de radios	Biseriado (%)	**	**	**
	Triseriados (%)	**	**	NS
	Multiseriados(%)	**	**	NS

Tabla 7. Coeficientes de correlación entre la densidad básica y los distintos tipos de tejidos xilemático N= 76

Rasgos anatómicos		DB
Vasos	Diámetro vaso (μm)	-0,24**
	Frec. vaso ($\text{N}^{\circ}/\text{mm}^2$)	-0,03
Fibras	Espesor pared de fibras (μm)	0,12
Radios	Longitud de radio (μm)	-0,28**
	Ancho de radio (μm)	-0,46**
	Radios/mm lineal	0,4**
	Vasos (%)	-0,19
Proporción de tejidos	Parénquima (%)	-0,48**
	Fibras (%)	0,59**
	Radios (%)	-0,42**
	Solitarios (%)	0,17
Tipo de vasos	Múltiples (2,3) (%)	0,08
	Múltiples Largos (%)	-0,23**
	Uniseriado (%)	-0,04
Tipo de radios	Biseriado (%)	0,28**
	Triseriados (%)	0,31**
	Multiseriados(%)	-0,31**

Tabla 8. Correlación entre parámetros colorimétricos del sistema CIELab 1976 y características anatómicas. $n=24$

Rasgos anatómicos del xilema	Parámetros colorimétrico				
	L*	a*	b*	C	h*
Diámetro vaso (μm)	-0,07	0,18	-0,002	0,04	-0,33
Frec. vaso ($\text{N}^\circ/\text{mm}^2$)	0,51**	0,08	0,39	0,32	0,51**
Espesor pared (μm)	-0,2	-0,08	-0,06	-0,07	0,05
Longitud de radio (μm)	0,13	0,13	0,03	0,06	-0,17
Ancho de radio (μm)	0,28	0,15	0,19	0,19	0,05
Radios/mm lineal	-0,34	-0,36	-0,37	-0,39	-0,02
Vasos (%)	0,23	0,15	0,23	0,22	0,12
Parénquima (%)	0,41**	0,19	0,12	0,14	-0,13
Fibras (%)	-0,39	-0,23	-0,15	-0,18	0,15
Radios (%)	0,04	0,13	-0,03	0,01	-0,3
Solitarios (%)	-0,13	0,1	-0,02	0,01	-0,19
Múltiples (2,3) (%)	-0,34	-0,36	-0,38	-0,38	-0,03
Múltiples Largos (%)	0,47**	0,21	0,37	0,34	0,26
Uniseriado (%)	0,2	0,33	0,09	0,15	-0,41**
Biseriado (%)	0,17	0,16	0,15	0,16	-0,04
Triseriados (%)	-0,18	-0,29	-0,28	-0,3	0,02
Múltiseriados(%)	0,02	0,07	0,1	0,1	0,06

ANEXO II

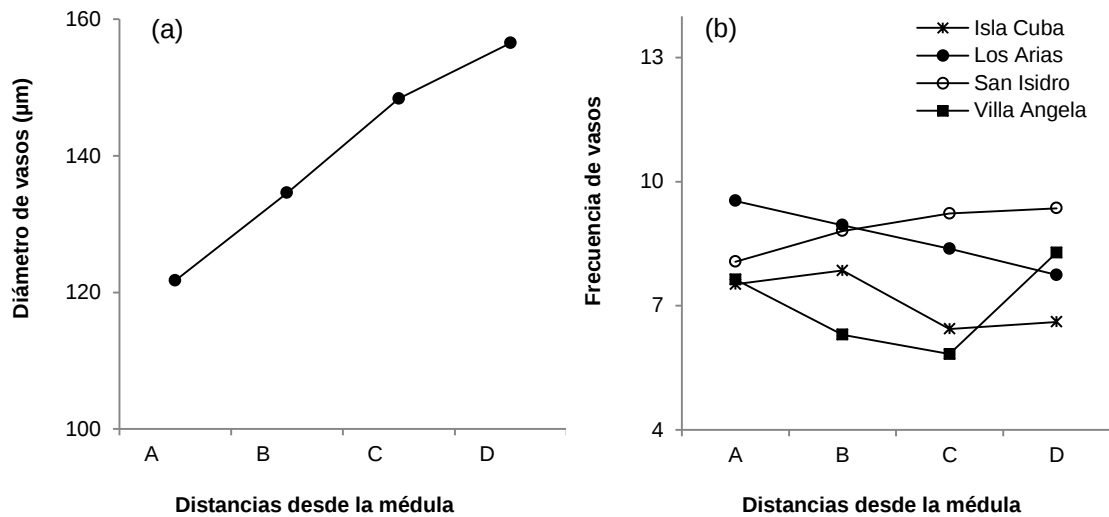


Figura 1. Variabilidad dentro del árbol del diámetro (a) y frecuencia (b) de vasos.

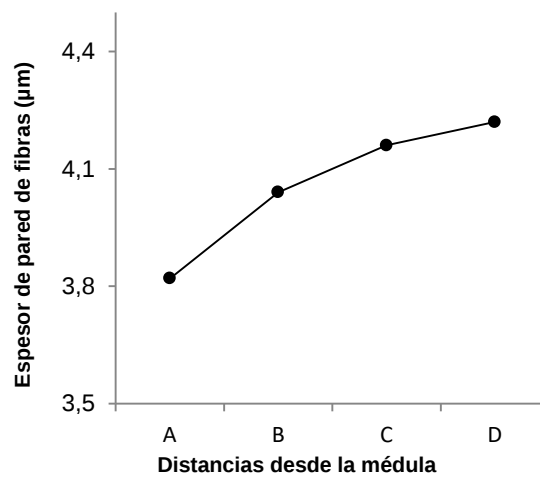


Figura 2. Espesor de pared de fibras, variabilidad dentro del árbol.

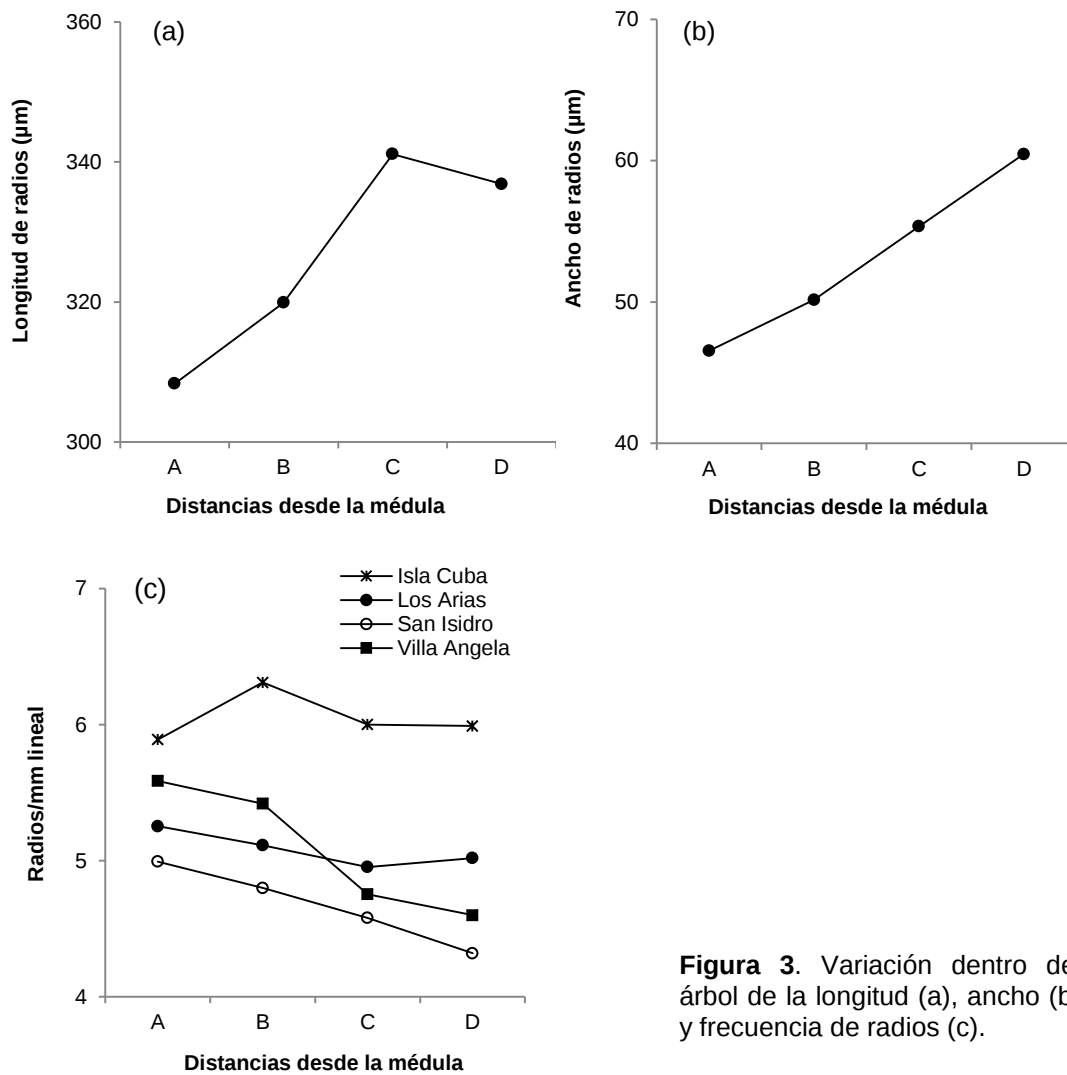


Figura 3. Variación dentro del árbol de la longitud (a), ancho (b) y frecuencia de radios (c).

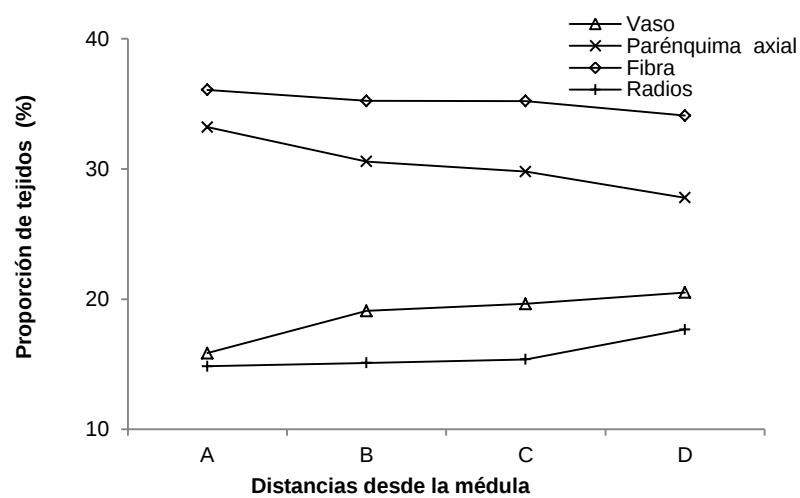


Figura 4. Variación dentro del árbol en el porcentaje de tejidos

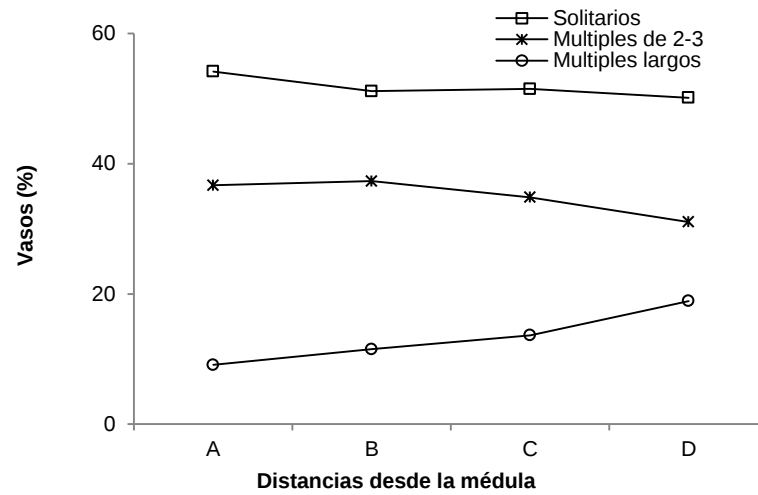


Figura 5. Variación dentro del árbol de tipos de vasos

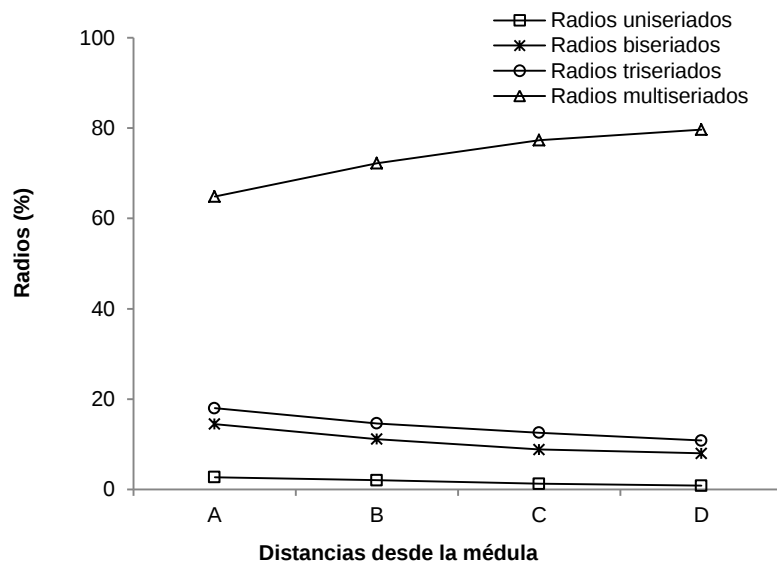


Figura 6. Tipos de radios leñosos y su variabilidad dentro del árbol.