



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

MÁSTER EN INGENIERÍA DE MONTES

**INFLUENCIA DE LA HUMEDAD Y
DENSIDAD EN LA DUREZA COMO
PROPIEDAD FÍSICO-MECÁNICA DE LA
MADERA**

Alumno: José María Roldán Rico

Tutor: Luis Acuña Rello

JUNIO 2014

Copia para el tutor/a

AGRADECIMIENTOS

Llegado este momento y como punto final de una etapa de mi vida, quiero dedicar unas palabras de agradecimiento y este trabajo, a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de estos años, que seguro no se volverán a repetir y han marcado un momento de mi vida, que ni mejor ni peor, pero seguro que muy diferente a todo lo que esté por llegar.

En primer lugar a todos esos compañeros de clase con los que he compartido momentos de risas que seguro que tanto ellos como yo echaremos de menos...

Al gran tutor, *Luis*, resolviendo dudas como si del primer día se tratase, mostrando una disponibilidad absoluta en cualquier momento...

A *mis padres* y a *Cristina*, por su apoyo incondicional de principio a fin, sabiendo marcar la diferencia como ellos solo saben...

A TODOS ELLOS, MUCHAS GRACIAS...

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN.....	4
2. ANTECEDENTES.	8
2.1. Introducción.....	10
2.2. Descripción de las especies.....	11
2.2.1. Acacia (<i>Robinia pseudoacacia</i> Linn.).....	11
2.2.2. Bubinga (<i>Guibourtia demeusei</i> J. León).....	12
2.2.3. Caoba (<i>Swietenia marcophylla</i> King.).....	12
2.2.4. Cerejeira (<i>Amburana caerensis</i> A. C. Smith).....	12
2.2.5. Chopo (<i>Populus canadensis</i> Moench I-214).....	13
2.2.6. Etimoe (<i>Copaifera salikounda</i> Heck.).....	13
2.2.7. Jatoba (<i>Hymenaea courbaril</i> L.).....	14
2.2.8. Plátano (<i>Platanus acerifolia</i> Wild).....	14
2.2.9. Talí (<i>Erythrophleum ivorense</i> A.).....	14
2.2.10. Tilo (<i>Tilia moltkei</i> Spaeth).....	15
2.3. Estructura y composición de la madera.	17
2.3.1 Estructura macroscópica de la madera.....	17
2.3.2. Estructura microscópica.....	18
2.3.3. Composición química de la madera.....	20
2.4. Propiedades de la madera.	21
2.4.1. Propiedades físicas.....	21
2.4.1.1. Anisotropía.....	21
2.4.1.2. Higroscopicidad.....	22
2.4.1.3. Polaridad.....	22
2.4.1.4. Densidad.....	22
2.4.1.5. Humedad.....	22
2.4.2. Propiedades mecánicas.....	23
2.4.2.1. Resistencia a la tracción.....	23
2.4.2.2. Resistencia a la compresión.....	23
2.4.2.3. Resistencia a la flexión.....	24
2.4.2.4. Resistencia cortante.....	24
2.4.3. Propiedades físico-mecánicas.....	24
2.4.3.1. Dureza.....	24

2.5. La dureza de la madera.	24
2.5.1. Métodos de ensayo de dureza.	25
2.5.1.1. Método Monnin.	26
2.5.1.2. Método Brinell.	27
2.5.1.3. Método Janka.	28
2.5.1.4. Otros métodos de ensayo de dureza.	28
2.5.2. Relación de la humedad con la dureza y la densidad de la madera.	29
3. OBJETIVOS.	30
3.1. Objetivo general.	32
3.2. Objetivos específicos.	32
4. MATERIAL Y MÉTODOS.	33
4.1. Materiales empleados.	35
4.1.1. Probetas de madera.	35
4.1.1.1. Especies.	35
4.1.1.2. Dimensiones.	35
4.1.2. Equipo de trabajo.	35
4.1.2.1. Cajas de ensayo	35
4.1.2.2. Calibre.	36
4.1.2.3. Balanza.	37
4.1.2.4. Estufa o cámara de secado.	37
4.1.2.5. Desecador.	38
4.1.2.6. Máquina universal de ensayo.	39
4.2. Metodología.	41
4.2.1. Medición de las probetas.	41
4.2.2. Determinación del peso de las probetas.	41
4.2.3. Realización de los ensayos de dureza.	41
4.2.3.1. Ensayos de dureza a carrera constante (2mm.).	42
4.2.3.2. Ensayos de dureza a fuerza constante (2 kN).	42
4.2.4. Determinación de la humedad.	43
4.3. Cálculo de propiedades físicas y mecánicas.	43
4.3.1. Densidad.	43
4.3.2. Humedad.	43
4.3.3. Dureza.	43
4.4. Tratamiento estadístico de los datos.	44
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	46
5.1. Análisis descriptivo.	48
5.1.1. Determinación de la variación de densidades anhidra para cada especie. .	48

5.1.2. Determinación de la relación entre la humedad y la dureza	49
5.2. Análisis comparativo	51
5.2.1. Comparación de la densidad anhidra entre especies.	52
5.2.2. Comparación de la dureza (carrera constante) entre especies.	54
5.2.3. Comparación de la dureza (fuerza constante) entre especies.....	56
5.3. Análisis predictivo.....	58
5.3.1. Variación de la dureza con la humedad.....	58
5.3.2. Comparación de la dureza entre especies, a carrera constate, en función de la humedad.	61
5.3.3. Comparación de la variación de la dureza a fuerza constate con la humedad entre especies.....	64
5.3.4. Variación de la dureza con la densidad anhidra.	67
5.3.5. Comparación de la variación de la dureza según la densidad anhidra por especie.....	71
5.3.6. Relación general entre las dos durezas.....	72
5.3.7. Relación de la dureza a humedad normal (12%).....	73
5.3.8. Relación de la dureza con la densidad anhidra y la humedad.....	74
6. CONCLUSIONES.....	75
7. BIBLIOGRAFÍA.....	78
8. ANEXOS.....	81

1. RESUMEN.

Alumno: José María Roldán Rico
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación: Máster en Ingeniería de Montes

1. RESUMEN.

Como consecuencia del uso constructivo (estructural) y decorativo (ebanistería) en el que es empleado la madera en multitud de situaciones, el presente estudio trata de mostrar el comportamiento de la madera bajo ciertos ambientes con humedades diferentes sobre un amplio abanico de especies de madera, incluyendo maderas tropicales, tratando de avanzar en el conocimiento de este tipo de estudios, los cuales no son muy abundantes.

Numerosas son las propiedades físico-mecánicas que pueden ser objeto de estudio trabajando con madera, pero es la dureza una de las más tratadas revisando la bibliografía existente. Es la heterogeneidad, la peculiaridad que presenta la propia madera en su composición, la que hace que esta se convierta en una característica con especiales particularidades, existiendo diversos métodos de ensayo para su determinación con valores muy diferentes entre ellos.

Dicha heterogeneidad viene determinada por las diferentes propiedades que determinan la composición de la madera y a su vez condicionarán la dureza de esta en función de las características ambientales a las que es sometida. Como factor extrínseco que afectará a dicho comportamiento, cabe señalar la humedad, y como factor interno, la densidad de la propia madera. Por ello, con el presente estudio se pretende dar una variación del comportamiento de la dureza que presentan diferentes especies de madera en función de dichos factores.

Para la realización de los ensayos que eran precisos para completar dicho análisis, nos basamos en el ensayo de Monnin, el cual trabaja con un cilindro como pieza de indentación y con unas pequeñas variaciones, ensayando cada pieza a carrera constante y a fuerza constante sobre cada una de las piezas.

Se realizaron un total de 588 mediciones sobre 294 probetas de 10 especies distintas y todas ellas frondosas, comprendiendo un rango de densidades muy variable. Cada una de las especies fue sometida a diversas condiciones de humedad, realizándose sobre cada una de ellas los dos siguientes ensayos:

- Dureza a carrera constante de 2 mm.
- Dureza a fuerza constante de 2 kN.

Una vez obtenidos los valores de los ensayos prácticos, se llevo a cabo un análisis estadístico con el fin de determinar las posibles diferencias entre ambos métodos para la determinación de la dureza como variable dependiente del comportamiento que presentaba la madera de las especies con las que se trabajo respecto a la densidad y/o humedad.

Los resultados muestran como hay especies que presentan durezas medias similares para cada uno de los ensayos.

Así mismo, tanto para los ensayos a carrera constante como los ensayos a fuerza constante existen especies que muestran un comportamiento similar en función de la humedad.

En cuanto a la densidad anhidra, se observa como la medida que esta aumenta, aumenta la dureza de la especie, siendo lineal en el caso de los ensayos de dureza a carrera constante e inversamente para los ensayos a fuerza constante.

La relación entre las dos durezas calculadas a partir de cada método de ensayo, ofrecían una relación exponencial, del mismo modo que para una humedad homogeneizada al 12%, con correlaciones muy altas ($>0,90$), en ambos casos.

Y finalmente destacar la influencia que tienen ambos factores (densidad y humedad) estadísticamente sobre la dureza, para cada uno de los métodos.

2. ANTECEDENTES.

Alumno: José María Roldán Rico
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación: Máster en Ingeniería de Montes

2. ANTECEDENTES.

2.1. Introducción

Cuando hablamos de la madera, nos estamos refiriendo a una de las materias primas que más uso se ha dado por parte del hombre a lo largo de su historia, tratándose de uno de los recursos naturales más antiguos del que dispone el hombre. Hombre y tecnología han evolucionado a lo largo de la historia. El hombre, siempre ha sentido la necesidad de dominar el medio que lo rodeaba, a través del descubrimiento y conocimiento de los materiales que la naturaleza le ofrecía, así el desarrollo de aptitudes encaminadas a transformar materiales y comenzar a fabricar herramientas compuestas.

La madera tiene un valor inapreciable, quizás único, ya que se trata de una fuente natural de recursos que el hombre es capaz de ir renovando, a diferente de otros recursos que la naturaleza ofrece, tales como el petróleo, que algún día se acabará, o las minas de carbón o minerales que también se agotarán. Mientras tanto, la conservación y mantenimiento de los bosques, permiten ser una fuente de madera indefinidamente. Las cifras de madera que se manejan son considerables, pero no debemos olvidar que la madera debe ser considerada como un material escaso, y por tal razón su transformación debe ser optimizada en todas las etapas de su proceso. Actualmente, en España nos encontramos con una situación no muy positiva, ya que a pesar de ser un país poco maderero, presenta un retraso respecto a las culturas norteamericana, escandinava o japonesa, entre otras. A pesar de ello, existe una globalización por parte de los mercados de la madera y la competitividad del producto, de tal manera, que este hecho puede permitir un desarrollo paralelo en todos los países.

Desde siempre, han sido numerosas las aplicaciones que se pueden enumerar, entre las que destaca su uso como fuente de calor, fabricación de armas, elaboración de numerosos útiles cotidianos en su día a día, y así hasta llegar a convertirse en uno de los principales materiales como elemento constructivo. Algunos datos arqueológicos hacen referencia a su utilización en procesos constructivos en el Neolítico.

Desde los primeros comienzos constructivos en madera hasta las construcciones más reciente a día de hoy, la madera se ha visto afectada negativamente por su deterioro ante los efectos de la humedad, viéndose afectadas sus propiedades químicas, biológicas, físicas y mecánicas, perdiendo las propiedades estructurales que la confieren como elemento constructivo..

Las fuentes de humedad a las que puede verse afectado un edificio o estructura, son diversas. Los orígenes de dicha humedad que desencadena patologías en la madera, pueden ser debidos a instalaciones sanitarias defectuosas, red de saneamiento horizontal, humedades procedentes del terreno, humedades procedentes de la cubierta y humedades en apoyos en muros y fachadas.

Hasta bien entrado el siglo XIX, únicamente se empleaban como medidas de protección los que afectaban al diseño arquitectónico y constructivo y la elección del material, quedando demostrada su eficacia por la pervivencia de numerosas construcciones antiguas. Posteriormente, con los avances en la química, comenzarán a utilizarse métodos de protección artificial. Sin embargo aquellos defectos que son adquiridos durante la vida de la propia estructura, generalmente por falta de mantenimiento, generarán humedades que facilitarán la actuación de ciertos organismos, tales como, hongos de pudrición, las termitas y gran parte de los insectos xilófagos de ciclo larvario, como consecuencia de la relación existente entre la humedad y dichos organismos.

La madera es un material dúctil resistente y proporciona una firme y sólida estructura. Claros ejemplos de la importancia que presenta este material en diversos ambientes de la construcción los podemos encontrar en la construcción de puentes, donde se empleaban casi todas las clases de madera; las esclusas de canales y ríos e incluso el control de la erosión de las orillas en ríos navegables mediante diques fabricados a partir de postes de madera revestidos por tablas horizontales; los primeros ferrocarriles; los encofrados de madera.

Con el objetivo de que sirva de base para estas aplicaciones u otras similares con posterioridad, se trata en el presente estudio de ofrecer un pequeño avance en el conocimiento del comportamiento de algunas propiedades de la madera, tal y como es el caso de la dureza, siendo esta, quizás, una de las que menos referencias exista actualmente.

2.2. Descripción de las especies.

2.2.1. Acacia (*Robinia pseudoacacia* Linn.).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades.**
Distribución espontánea por la región atlántica de Estados Unidos, desde Pensilvania hasta Georgia, abundando considerablemente en Virginia y extendiéndose por la mayor parte de Norteamérica. En Europa fue introducida en el siglo XVII, ocupando desde el mediterráneo hasta el Sur de Suecia, habiéndose difundido también por el Norte de África, Asia Suroccidental y Oriental y Nueva Zelanda. En España se puede observar en parques y jardines, calles y camino de todas las provincias peninsulares.
- **Descripción de la madera.**
La madera presenta vasos en distribución de anillo poroso, aislados o en alineación de 4 o más vasos, en formaciones radiales u oblicuas, en disposición tangencial o agrupados. Los anillos de crecimiento están claramente diferenciados, fibras de paredes gruesas, parénquima longitudinal apotraqueal y paratraqueal vasicéntrico, radios leñosos en número por milímetro entre 4 y 12 y con albura y duramen bien diferenciados.
- **Usos y aplicaciones.**
Entre las aplicaciones más destacadas de la Acacia, destacan: ebanistería, carruajes, muebles de jardín y terrazas, remos, pértigas, torneadores, bastones, construcción naval y cajas de adorno y objeto de regalo.

2.2.2. Bubinga (*Guibourtia demeusei* J. León).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades.**
Su área geográfica de producción se encuentra en el oeste de África. Se trata de uno de los fustes de África de mayor envergadura, lo que permite la elaboración de grandes chapas finas con mallados formando una secuencia, por el contrario, presenta un alto contenido en sílice, lo que dificulta su mecanizado. Es una madera apta para la obtención de chapa mediante corte a la plana.
- **Descripción de la madera.**
Presenta una albura y duramen diferenciados, con la albura de color blancuzco a gris rosáceo y el duramen de tonos pardo rojizos a violáceos. Los anillos de son visibles y marcados. Esta madera presenta además una textura homogénea, fina, aspecto semimate, fibra casi siempre recta y en escasas ocasiones algo cruzada u ondulada.
- **Usos y aplicaciones.**
La madera de Bubinga es utilizada en diversas aplicaciones, entre las que destacan: chapas finas decorativas, tableros y paneles decorativos, ebanistería, carpintería exterior e interior, fondos de vehículos y contenedores, escaleras, barandillas, suelos o artesonados, taraceados, muebles, carpintería de armar, mostradores, torneados, mangos de cubiertos, dorsos de cepillos e instrumentos musicales entre otros.

2.2.3. Caoba (*Swietenia marcophylla* King.).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades**
Su área de producción se encuentra en la zona oriental de América Central y parte tropical de América del Sur. Se trata de una especie protegida, incluida en las CITES. Actualmente su interés comercial es mínimo debido a su escasez, como consecuencia de una explotación abusiva, habiendo sido una de las maderas más valoradas por su estabilidad y belleza.
- **Descripción de la madera**
Albura y duramen bien diferenciados, con albura de color blanca-amarillenta y el duramen pardo canela a pardo-rojizo. Los anillos de crecimiento son visibles e irregulares delimitados por líneas más claras. Esta madera presenta una textura fina, homogénea, lustrosa con fibra recta que en ocasiones es algo entrelazada.
- **Usos y aplicaciones.**
La Caoba es empleado en diversos usos y aplicaciones, entre los que destacamos: chapas finas decorativas, tableros rechapados, muebles de lujo, torneados, sillería, escaleras, balaustres, carpintería interior y exterior, decoración de barcos y vagones, mangos de herramientas, paneles y tableros decorativos, ebanistería de lujo, tallas, marcos de cuadros, instrumentos musicales, construcción naval, estructuras y arcadas, entre otras muchas aplicaciones.

2.2.4. Cerejeira (*Amburana caerensis* A. C. Smith).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades.**

El área geográfica de producción se extiende por América Tropical, concretamente en el sur y oeste de la cuenca del Amazonas. Sus masas forestales son escasas, su producción es importante y su exportación estable. Esta madera presenta como peculiaridades su tacto ceroso y su olor a vainilla. Presenta buenas aptitudes para la obtención de chapa por desenrollo y mediante corte a la plana.

- **Descripción de la madera.**

Presenta albura y duramen apenas diferenciados, con un color de albura rosa pálido y castaño anaranjado claro para el duramen. Los anillos de crecimiento apenas son perceptibles. La textura es uniforme y la fibra recta o ligeramente entrecruzada.

- **Usos y aplicaciones.**

Entre los usos en los que es de aplicación de la Cerejeira, caben destacar: chapas finas decorativas, paneles y tableros decorativos, tableros contrachapados, tarimas, parquet, molduras, frisos, escaleras, cubas, tonelerías, muebles, ebanistería, carpintería de interiores y exteriores, carpintería de armar y esculturas.

2.2.5. Chopo (*Populus canadensis* Moench I-214).

- **Área geográfica de distribución y peculiaridades.**

Se trata de un clon híbrido italiano hembra, perteneciente a la especie híbrida *Populus x euramericana* (Dode) Guinier o *Populus x canadensis* Moench. Sus plantaciones se centran en las vegas de ríos, con valles abiertos, que determinan zonas de capa freática alta, sin encharcamiento continuo.

- **Descripción de la madera.**

La madera es muy blanda, blanca, sin corazón diferenciado, y fibra homogénea, además de lisa y ligera y una calidad muy discutida.

- **Usos y aplicaciones.** Es uno de los clones más utilizados en la populicultura española, ocupando un 70% de las poblaciones de chopo (Enríquez e Iglesias-Sauce, 2012). Su producción se centra fundamentalmente en la producción de madera. La madera es apta para aserrío, chapa plana, desenrollo y pasta de celulosa.

2.2.6. Etimoe (*Copaifera salikounda* Heck.).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades.**

El área geográfica de distribución se extiende por el Este y Centro de África. Sus masas forestales, su producción y su exportación son escasas. La madera de esta especie en ocasiones presenta resina. Se trata de una madera apta para la obtención de chapa por desenrollo y mediante corte a la plana.

- **Descripción de la madera.**

La albura y duramen están diferenciados. El color de la madera varía del rosa cobrizo al pardo violáceo. Los anillos de crecimiento son indeterminados. La textura es media, lustrosa.

- **Usos y aplicaciones.**

Entre los usos y aplicaciones a los que se destina la madera de Etimoe, se pueden destacar: chapas finas decorativas, tableros y paneles decorativos,

tableros contrachapados, muebles, ebanistería, carpintería interior y exterior, construcción naval, suelos, molduras y torneados.

2.2.7. Jatoba (*Hymenaea courbaril* L.).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades.**
Las áreas geográficas de producción se extienden por América Central y Norte de Sudamérica. Existen pocas masas forestales, pero su producción y exportación, son importantes. Produce una resina cristalina denominada “Copal de América” o “jutaí-cica” que se utilizan en la industria como barniz natural y como base medicinal. No es una madera apta para desarrollo, pero presenta una buena aptitud para la obtención de chapa mediante corte a la plana.
- **Descripción de la madera.**
La albura y el duramen se presentan diferenciados, con un color blanco cremosos para la albura y color castaño cobrizo para el duramen. Los anillos de crecimiento son poco discernibles. Textura media de aspecto lustroso, con fibra recta y en ocasiones un poco a contrahilo.
- **Usos y aplicaciones.**
La madera de Jatoba es empleada en: tableros decorativos, chapas finas decorativas, suelos y tarimas, carpintería interior y exterior, tornería, elementos de construcción para carruajes, muebles, ebanistería, escaleras, tallas y esculturas, construcción naval y arcos de instrumentos musicales.

2.2.8. Plátano (*Platanus acerifolia* Wild).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades.**
La especie se distribuye por Europa, principalmente en el sur, y en Asia. Sus masas forestales son importantes, y su producción y exportación son estables. Su madera presenta buenas aptitudes para la obtención de chapa mediante corte a la plana.
- **Descripción de la madera.**
El color de la madera de albura varía del blanco al amarillo claro y el del duramen es marrón rojizo. Los radios leñosos son visibles, muy anchos y llamativos. La fibra es entrelazada.
- **Usos y aplicaciones.**
La madera de esta especie se emplea en: chapas para recubrimientos decorativos, mobiliario, tornería, marquetería y mangos de herramientas.

2.2.9. Talí (*Erythrophleum ivorense* A.).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades.**
Se encuentra en el oeste, centro y este de África. Sus masas forestales son importantes, mientras que su producción y exportación son escasas o casi despreciables.
- **Descripción de la madera.**
La albura presenta un aspecto blanco-amarillento a blanco-rosado y el duramen de pardo-amarillento a pardo-rojido. La fibra es recta, presentándose frecuentemente entrelazada o muy entrelazada.

- **Usos y aplicaciones.**

Entre sus aplicaciones destacan: carpintería exterior, carpintería interior (suelos), carpintería de armar, obras hidráulicas, postes, traviesas, muebles de jardín y tornería.

2.2.10. Tilo (*Tilia moltkei* Spaeth).

- **Área geográfica de producción y peculiaridades.**

Se trata de una especie híbrida entre el *Tilo americana* y el *Tilo petiolaris*, exótica originaria de Europa.

- **Usos y aplicaciones.**

Empleada como ornamental, en veredas anchas, ramblas, plazas y parques y en medicina popular como sedante.

Tabla 2.1. Caracterización de las propiedades tecnológicas de las especies de madera.

Propied. tecnol. Especies	PROPIEDADES FÍSICAS						PROPIEDADES MECÁNICAS					
	DENSIDADES (Kg/m ³)			CONTRACCIONES (%)			CARGAS DE RESISTENCIAS MECÁNICAS (Kg/cm ²)				COMPORTAMIENTO MECÁNICO	
	Madera verde	Madera secada al aire 12%	Madera secada en secadero al 8%	Radial	Tangencial	Volumétrica	Tracción máxima	Compresión axial	Flexión axial	Módulo de elasticidad	Dureza	Higroscopicidad
Acacia	900	780	730	5	7	10	1450	770	1365	115000	Dura	Muy baja
Bubinga	1200	925	885	5,1-5,3	7,9-8,5	14	1430	750	1900	150000	Dura	Baja
Caoba	800	650	625	3	5	8	1200	580	980	90000	Semidura	Media
Cerejeira	850	600	575	8	5	3	--	435	800	88000	Semidura	Media
Chopo	700	300	280	3,4	8	11,4		250-480	500-800	70000		
Etimoe	1000	730	690	4,5	6,5	12	1200	675	1250	115000	Semidura	Baja
Jatoba	1100	910	870	4,5	8	12,5	1580	930	1800	190000	Dura	Muy baja
Plátano	-	-	-	5	8	14,1	2	420-630	970-1200	103000	Semidura	-
Talí	-	920	-	-	-	0,52	1200	750	1700	140000	Muy dura	-
Tilo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2.3. Estructura y composición de la madera.

La madera proporciona al árbol una estructura que actúa como sostén y arraigo a la tierra, para ello, tronco y ramaje crecen cada año con el fin de soportar su propio peso, el de su follaje y el de sus frutos. La naturaleza permite que dicha formación se realice creando unas estructuras huecas, zunchadas entre sí, formando paredes tubulares helicoidales con gran resistencia a la tracción - debido a un material altamente resistente llamado celulosa- y compresión – debido a un material altamente resistente llamado lignina-, que no han logrado ser superadas.

2.3.1 Estructura macroscópica de la madera.

Si se realiza un corte al fuste de un árbol, se puede observar cómo este está compuesto por una serie de elementos, los cuales son:

- **Corteza:** parte más externa, constituida por materia muerta con aspecto resquebrajado, como consecuencia de un crecimiento del árbol en espesor, mientras que la corteza no lo hace.
- **Liber o floema:** Capa más o menos delgada de apariencia similar a la corteza y que tiene como función la conducción de la savia elaborada.
- **Cambium:** Capa prácticamente inapreciable a simple vista, formada por células con funciones reproductoras, que forma xilema hacia dentro y floema hacia fuera. Se nutre de la savia elaborada en las hojas mediante el proceso de fotosíntesis.
- **Xilema:** o también conocido comúnmente como madera, es la capa más interna, normalmente gruesa, en relación con el resto de capas y que tiene como función, el sostén del árbol y la conducción de la savia sin elaborar. El xilema se subdivide en madera de médula, madera de duramen y madera de albura.

Además de los elementos anteriormente mencionados, el propio xilema presenta las siguientes características:

- **Anillos de crecimiento:** en aquellos lugares donde existen periodos meteorológicos notablemente diferentes, las especies de madera producen elementos anatómicos de diferentes tamaños, manifestándose exteriormente por la alternancia de madera más clara y madera más oscura. La apariencia de los anillos de crecimiento es diferente según el corte que se produzca en la madera, de tal forma, que ante un corte transversal, observaremos dichos anillos en forma de círculos concéntricos, ante un corte radial, se apreciarán como líneas paralelas, y con un corte longitudinal tangencial los anillos se apreciarán en forma de V invertida.
- **Albura y duramen:** en la madera del tronco de muchas especies se distinguen dos zonas o tipos de madera con tonalidades diferentes, estas son, la albura y el duramen. La madera más vieja formada hacia dentro con unos años de antelación, queda hacia el centro, secándose, endureciéndose y oscureciéndose, y es lo que se conoce como duramen. Por el contrario, la que

nace más nueva queda más al exterior del fuste, y recibe el nombre de albura, siendo esta más húmeda, más clara y menos densa.

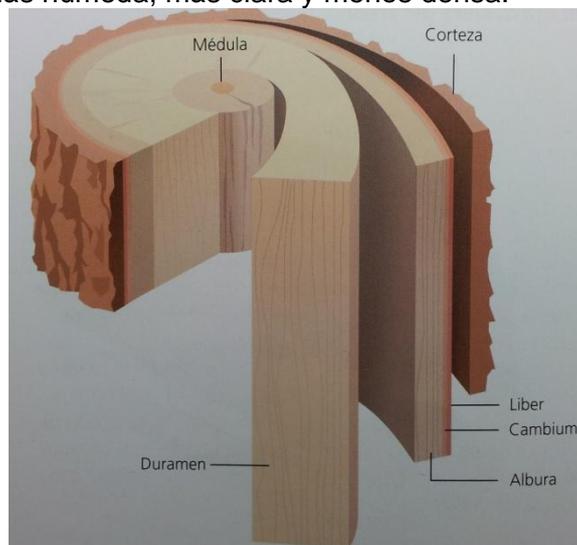


Figura 2.1. Detalle de la estructura macroscópica de la madera (Fuente: Cigalat Figuerola y Soler Burillo, 2003)

- **Disposición de la fibra:** cada especie presenta una orientación de la fibra con respecto a l eje axial, con ligeras inclinaciones a derecha o izquierda, aunque la mayoría presenta una orientación según el eje axial. Además de estos casos, nos podemos encontrar con maderas en las que se presentan una orientación de la fibra alternadamente a derecha y a izquierda, determinando así aspectos característicos en los cortes longitudinales.

2.3.2. Estructura microscópica.

Haciendo un análisis más profundo sobre la madera, se puede comprobar que está constituida por células, generalmente de forma alargada, dispuestas en su mayoría en la dirección del eje del árbol, mientras que tan solo un pequeño porcentaje tienen formas más o menos rectangulares o están orientadas transversalmente al eje del árbol en una dirección radial.

Tanto en maderas de coníferas como de frondosas, existen dos tipos de tejidos fundamentales:

- **Prosenquimatosos:** también denominados conductores, son tejidos de prosénquima, es decir, tejidos formados por células alargadas, fusiformes o filiformes, firmemente unidas por sus cabos o extremos puntiagudos, de membranas engrosadas en mayor o menor grado, y sin contenido protoplasmático o muy poco.



Figura 2.2. Detalle de los tejidos prosenquimatosos (Fuente: Wilson & White).

- **Parenquimatosos:** están constituidos por células más o menos isodiamétricas de membranas sutiles, no lignificadas, y con protoplasma parietal.

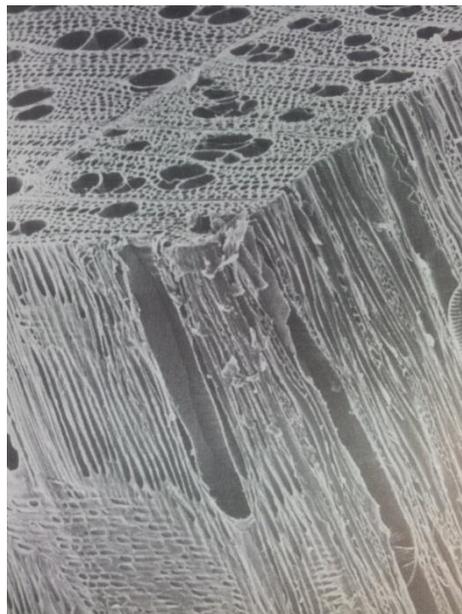


Figura 2.3. Detalle de los tejidos parenquimatosos (Fuente: Wilson & White).

A pesar de que tanto los tejidos de coníferas como de frondosas puedan estar formados por cualquiera de estos dos tejidos, existen diferencias microscópicas entre ambas.

Tabla 2.2. Diferencias microscópicas entre maderas de frondosas y coníferas.

	TEJIDO	CONÍFERA	FRONDOSA
ELEMENTOS LONGITUDINALES	PROSENQUIMATOSO	Traqueidas normales Traqueidas resinosas Traqueidas en cadena	Vasos: elementos vasculares Traqueidas vasculares Traqueidas vasicéntricas Fibrotraqueidas Fibras libriformes
	PARENQUIMATOSO	Parénquima longitudinal Células epiteliales de los canales resiníferos longitudinales	Parénquima de células fusiformes Parénquima de células septadas Células epiteliales secretoras que rodean los canales
ELEMENTOS TRANSVERSLES	PROSENQUIMATOSO	Traqueidas radiales	No existen
	PARENQUIMATOSO	Células de parénquima de los radios leñosos Células epiteliales de los canales resiníferos transversales	Células de parénquima radial procumbentes: radios homogéneos Procumbentes y erectas: radios heterogéneos

2.3.3. Composición química de la madera.

Los elementos anatómicos que constituyen la madera pueden diferir entre especies, mientras que la composición química, es casi constante en sus componentes, que consta en esencia de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Sus componentes principales son los que fundamentalmente determinan las propiedades físicas y mecánicas de la madera, siendo estos:

- **Celulosa:** Es el elemento elástico por excelencia del que dispone la madera. Constituye entre el 40 y el 50% de la madera. Es un polímero lineal homogéneo, polisacárido, formado por uniones de celobiosa (C₆H₁₀O₅). Supone la sustancia que actúa de sostén para la membrana celular y es insoluble en agua.
- **Hemicelulosa:** Son polisacáridos lineales de elevado peso molecular que contiene pequeñas cantidades de ácido unónico. Constituye entre un 15 y un 35% de la madera y está ligada estrechamente a la celulosa, presentando su misma composición, pero donde la unidad pueden ser hexosas o pentosas. Este componente interviene de modo decisivo en el proceso de hinchazón y merma de la madera.
- **Lignina:** Componente protector de la celulosa, material hidrófobo, cuya resistencia se ve disminuida con la absorción de agua. Constituye entre el 20 y

el 35% de la madera. Se trata de un polímero tridimensional compuesto de unidades de fenil-propano. Actúa como adhesivo de las unidades estructurales compuestas por las otras materias. Tiene como función reforzar y dar rigidez a las membranas celulares, determinando la resistencia de la madera a la presión. Pocos organismos se alimentan de ella, proporcionando una gran durabilidad a la madera.

Mientras que como componentes secundarios destacamos:

- **Sustancias de impregnación:** formando parte de la madera entre un 1 y un 3%. Se trata de diferentes combinaciones aromática, que influyen en el color de la madera, su olor, en las características de la superficie, su durabilidad o resistencia a los parásitos entre otros aspectos. Los más importantes son los ácidos resínicos y los terpenos.

2.4. Propiedades de la madera.

Para poder comprender mejor el comportamiento de la madera, haremos una breve clasificación de las propiedades que presenta, que siempre que hablemos de madera, deberemos tener en cuenta.

2.4.1. Propiedades físicas.

2.4.1.1. Anisotropía

La madera no es un material homogéneo, tratándose de un material muy diferente según el plano o la dirección que se tome en consideración, y como resultado de esto, presenta desigual comportamiento. Debido a esto, se puede observar como el comportamiento mecánico varía según las diferentes direcciones, de tal manera que la madera presenta una resistencia de entre 20 y 200 veces superior en el sentido del eje del árbol que el sentido transversal. De esta manera podemos distinguir una serie de planos y direcciones (Figura 2.4), siendo estos:

- **Dirección axial:** la del eje del árbol
- **Dirección radial:** dirección de los radios en una sección perpendicular al eje del árbol
- **Dirección tangencial:** dirección transversal perpendicular al eje del árbol.

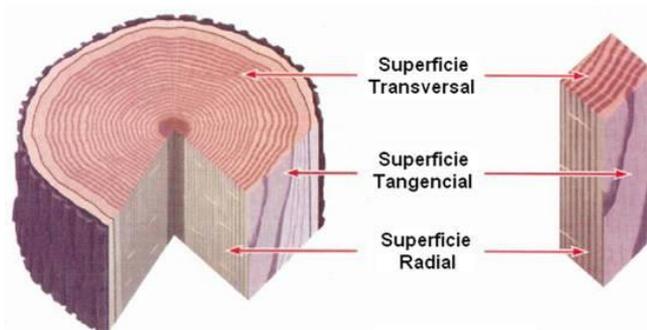


Figura 2.4. Principales direcciones de la madera.

2.4.1.2. Higroscopicidad.

Esta propiedad hace referencia a la capacidad que tienen ciertos materiales de absorber humedad de la atmósfera que les rodea y de retenerla en forma de agua líquida o vapor de agua. La madera contiene huecos en el lumen celular, entre las microfibrillas y entre las fibrillas elementales, siendo susceptibles de ser ocupados por agua. Las fuerzas capilares existentes entre los diferentes huecos de la madera, hace que unos sean más propensos a alojar agua de la atmósfera, de tal forma que el agua contenida en la atmosfera puede estar en alguna de las siguientes formas:

- **Agua de sorción:** es la que está retenida por fuerzas de tipo Van der Waals, consecuencia de los grupos polares activos de la pared celular.
- **Agua de adsorción:** es el agua que queda retenida en la pared celular como consecuencia de la fuerza de adhesión superficial.
- **Agua capilar:** es la retenida por fuerzas capilares, provocadas por los espacios entre microfibrillas.
- **Agua libre:** es la contenida por en el lumen por las células prosenquimatosas.

2.4.1.3. Polaridad.

La madera es un material con carácter polar y como consecuencia de ello, tiene afinidad con los productos polares entre los que se incluye el agua.

2.4.1.4. Densidad.

Se define densidad como la relación que existe entre la masa y el volumen. Tanto la masa como el volumen de la madera, varían en función de su contenido de humedad, por ello, cuando se hable de densidad en la madera, se debe hacer referencia para un determinado contenido de humedad, como puede ser, del 0% (densidad anhidra), del 12% (densidad normal) o a cualquier otra humedad de la madera.

Las maderas más ligeras, es decir, de menos densidad, son las que más variación de humedad pueden tener, como consecuencia de un mayor volumen de huecos respecto a las maderas más pesadas.

Esta propiedad viene determinada por la siguiente expresión:

$$\varphi = \frac{m}{v} ;$$

dónde φ es la densidad, m la masa y v el volumen.

2.4.1.5. Humedad.

Este concepto se puede definir como la masa de agua contenida en una pieza de madera, expresada en tanto por ciento, respecto de la propia masa de madera de esta

pieza en estado anhidra. Este factor influye en el comportamiento de la madera sobre su durabilidad, resistencia, peso y dimensiones, entre otros aspectos.

La expresión que determina la cantidad de humedad en una pieza de madera es:

$$H\% = \frac{Ph - Pa}{Pa} \times 100$$

dónde Pa, la masa de la pieza de madera exenta de agua y Ph el peso de la madera al H% de humedad.

De la relación entre la madera y la humedad surge un concepto denominado *Humedad de Equilibrio Higroscópico* (HEH), que se define como aquella humedad que alcanzaría la madera a lo largo del tiempo, sometida a unas ciertas condiciones de humedad y temperatura del medio ambiente.

2.4.2. Propiedades mecánicas.

Además de nutrirse, el árbol necesita que la estructura de la parte madera se lo suficientemente resistente para mantenerlo en pie. Como hemos visto anteriormente, el secreto de la resistencia mecánica de la madera, con relación a su peso, está en la estructura de la pared celular, siendo los dos elementos principales la celulosa y la lignina.

La madera es un material anisótropo e higroscópico, de tal manera que sus propiedades mecánicas varían con la dirección del esfuerzo y con la humedad.

El concepto de resistencia de la madera va asociado con un criterio probabilístico, de tal manera, que se suele expresar en forma de valor característico referido al quinto percentil de una distribución de frecuencia de la resistencia.

A continuación se describen las que se consideran como las propiedades mecánicas de la madera.

2.4.2.1. Resistencia a la tracción.

La madera posee una elevada resistencia a la tracción paralela a las fibras, como consecuencia de la elevada resistencia que las cadenas de celulosa presentan ante esta sollicitación mecánica. Por el contrario, su resistencia a la tracción perpendicular es muy baja, del orden de 30 a 70 veces inferiores, debida a la orientación marcadamente longitudinal de la estructura de la madera, muy preparada para resistir las sollicitaciones de flexión a que se ve sometido el árbol en pie.

Algunos valores característicos de esta propiedad en dirección longitudinal para madera clasificada en coníferas oscilan entre 110 y 210 kg/cm², mientras que los correspondientes a la dirección transversal, apenas alcanzan los 3 o 4 kg/cm² (Casado Sanz y Acuña Rello, 2000).

2.4.2.2. Resistencia a la compresión.

En la madera clasificada, la resistencia a la compresión es mayor que su resistencia a la tracción, a la vez que la diferencia de valores entre las dos direcciones (paralela y perpendicular es menos acusada).

Los valores característicos que hacen referencia a la resistencia a la compresión paralela en madera clasificada de coníferas se sitúan entre 180 y 250 kg/cm² mientras que los correspondientes a la dirección transversal se sitúan entre 48 y 60 kg/cm² (Casado Sanz y Acuña Rello, 2000).

2.4.2.3. Resistencia a la flexión.

En la práctica, esta propiedad es considerada independiente del resto, aunque bien se puede decir que es una combinación de las citadas anteriormente.

La madera presenta una notable resistencia a la flexión, especialmente comparándose con su densidad. La flexión que se origina una pieza genera tensiones de compresión y de tracción paralelas a la fibra, tomando valores máximos en las fibras externas de la pieza, mientras que en la fibra neutra toma valores nulos.

2.4.2.4. Resistencia cortante.

Este tipo de resistencia es debido a solicitaciones en dirección perpendicular a las fibras, pudiendo general otras de tipo tangencial como consecuencia de la deformación de la madera.

2.4.3. Propiedades físico-mecánicas.

2.4.3.1. Dureza.

Se puede definir esta propiedad como la facilidad de penetración de un material en otro. Si atendemos al comportamiento de la madera desde el punto de vista de este concepto, se puede observar como presenta ciertas desventajas frente a otros materiales, tales como acero y hormigón, debido a que la madera es un material más blando, presentando una facilidad de rayado y perdiendo por tanto, apariencia en su superficie. Por el contrario presenta como ventajas su facilidad de procesado.

Además, podemos decir que la dureza de la madera es una característica que se puede considerar a la vez como una virtud y un defecto. Las maderas duras suelen ser más densas, más resistentes a hongos y xilófagos y las de mayor belleza y calidad, por ello hablamos de virtud, pero además son más propensas a fendas, difíciles de secar y trabajar, lo que presenta un defecto.

2.5. La dureza de la madera.

La dureza es una condición de la superficie del material, no representan ninguna propiedad de la madera y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. Es un concepto que ofrece una idea de solidez o firmeza, definiéndola según el método particular que se utiliza para la determinación de su valor. En nuestro caso, se trata de una determinación de la dureza como resistencia a la indentación

permanente bajo cargas estáticas, denominándose esta, por tanto, como dureza por penetración.

Los diferentes métodos que se pueden emplear para medir la dureza, generalmente consisten en producir una deformación local sobre el material que se ensaya mediante el empleo de un indentador. Los valores que de ellos se puedan obtener, son siempre dependientes del método que es empleado y las condiciones en las que se ensaya, de tal modo, que para que un valor de dureza sea útil y permita su comparación debe estar acompañado de ambos aspectos, método empleado y condiciones del ensayo.

2.5.1. Métodos de ensayo de dureza.

La medición de la dureza en la madera se encuentra con un problema, debido a su heterogeneidad, anisotropía e higroscopía, que no se plantea en otros materiales como los metales, debido a que se tratan de cuerpos isótropos y homogéneos.

Muchas son las formas para determinar esta característica en la madera, todas ellas bajo el fundamento del *esfuerzo necesario para hacer penetrar en la madera un objeto, generalmente de acero*, según cada uno de los diferentes métodos.

De esta manera, se presentan una serie de valores (ver Tabla 2.3.) para algunas especies empleadas en España que han sido sometidos a los ensayos que posteriormente se describirán. Dichos ensayos quedan descritos más abajo.

Tabla 2.3. Valores de dureza de especies utilizadas en España. (Fuente: Vignote Peña y Martínez Rojas).

Ensayo Especie	Monnin (perp.)	Brinell (perp.)(kp/mm ²)	Brinell (perp.)(kp/mm ²)	Janka (perp.)(kp/mm ²)
Abeto	1,5	2,1	3,2	-
Alerce	2,7	2,2	4,9	-
Balsa	0,2	0,25	0,55	-
Bubinga	8,2	3,8	-	1.200
Calabó	1,3	1,6	3,4	170
Caoba	2,7	1,8	3,7	360
Cerezo europea	4,3	2,9	5,4	-
Haya	4	2,8	7,1	-
Iroko	4	2,9	-	560
Okume	1,4	1,2	3	170
Peral	5	3,1	5,5	-
P. amarillo del Sur	2,4	2	4,4	-
P. silvestre	1,9	1,8	4	-
Samba	1,2	1,3	-	190
Sapelly	3,6	2,5	-	670
Teca	4	3,1	-	440

Los métodos existentes actualmente son muy diversos, y a continuación se hará una breve descripción de los más destacados.

2.5.1.1. Método Monnin.

Se trata de un método seguido por las normas francesas y las UNE españolas. En España la dureza de la madera se mide de acuerdo con lo establecido en la norma **UNE-56.534** mediante la aplicación del método Monnin. Dicho método consiste en la aplicación de una carga de 100 kp. por centímetro de ancho de la probeta, a través de un cilindro de acero de 30 mm. de diámetro. Determina la dureza sólo en la dirección tangencial, aunque puede hacerse también en la dirección radial.

La clasificación que establece la **norma UNE 56.540** respecto a la dureza es la siguiente (Tabla 2.4):

Tabla 2.4. Clasificación de la dureza según Norma UNE 56.450.

Especie	Dureza	Clase
RESINOSAS	1-2	Blandas
	2-4	Semiduras
	4-20	Duras
FRONDOSAS	0,2-1,5	Muy blandas
	1,5-3,0	Blandas
	3,0-6,0	Semiduras
	6,0-9,0	Duras
	9,0-20	Muy duras

A parte de la clasificación de dureza establecida anteriormente, existe otra clasificación del propio método de ensayo Monnin tal y como se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Índice de dureza Monnin.

Categoría	Frondosas	Resinosas
Muy duras	>9	>9
Duras	6-9	4-9
Semiduras	3-6	2-4
Blandas	1,5-3	1-2
Muy blandas	<1,5	<1

A su vez, en la Tabla 2.6, Monnin, establece para los valores de dureza, las aplicaciones y usos a los que pueden ser destinadas las maderas.

Tabla 2.6. Utilización de las maderas en función de su dureza Monnin.

Dureza Monnin	Clasificación dureza	Uso de la madera
3-6	Baja	Carpintería
6-9	Media	Industria
9-12	Alta	Aplicaciones

Los valores de dureza determinados mediante este método son el resultado de la aplicación de las siguientes expresiones:

$$NM = 1/f ; \text{ siendo } f = 15 - 0,5\sqrt{900 - b^2};$$

dónde b es el ancho de huella.

2.5.1.2. Método Brinell.

Este método consiste en presionar la superficie del material a ensayar con una bolilla de acero muy duro o carburo de tungsteno, produciéndose así una impresión de dicha pieza correspondiente a la porción de la esfera que penetra.

El valor determinado por este método, viene determinado por la siguiente expresión y resulta de dividir la carga aplicada P por la superficie del casquete esférico:

$$HB = \frac{P}{\pi Dh} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ [kg/mm}^2\text{]};$$

dónde P es la carga aplicada y πDh , la superficie del casquete donde, D , es el diámetro de la bola y h , la profundidad del casquete.

Esta expresión se emplea en el caso de medición directa de la flecha de penetración. Si esto no fuera posible, se determinará mediante la medición del diámetro de la huella dejada en la madera.

Para la determinación de h , se sigue el siguiente procedimiento a partir de la Figura 2.4:

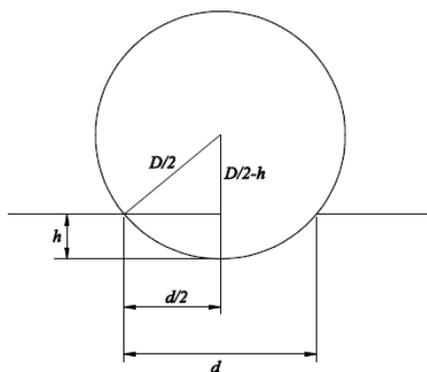


Figura 2.4. Determinación del valor de h .

La profundidad de indentación (h) será expresada en función de los diámetros de la bola D y de la huella d . A través de la aplicación del teorema de Pitágoras obtenemos el valor de la profundidad de indentación que puede ser sustituido en la expresión del método y viene determinado por la siguiente expresión:

$$h = D \pm \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

La interpretación de los resultados que se puedan obtener en un ensayo tipo Brinell, se reflejan a continuación (Tabla 2.7):

Tabla 2.7. Clasificación de la dureza por el método Brinell.

Clasificación	Dureza Brinell
Muy blanda	<1
Blanda	1-2
Semidura	2-4
Dura	4-8
Muy dura	>8

2.5.1.3. Método Janka.

Este ensayo se presenta como una modificación del anterior, expresándose la dureza en las mismas unidades que en kp/cm^2 . Consiste en determinar el esfuerzo necesario para hacer penetrar en la madera, una esfera de acero, hasta su plano diametral, cuya sección mide 1 cm^2 , que corresponde a un diámetro de 11,28 mm. Observando la Tabla 2.8, vemos la clasificación que toman los valores para este ensayo.

Tabla 2.8. Clasificación de la dureza por el método Janka.

Clasificación	Dureza Janka
Muy blanda	<350
Blanda	350-500
Semidura	500-650
Dura	650-1000
Muy dura	1000-1500

Tanto la dureza Brinell como la Janka, se utiliza en las tres direcciones principales: longitudinales, tangencial y radial.

2.5.1.4. Otros métodos de ensayo de dureza.

Además de los ensayos de dureza anteriormente, que aunque menos utilizados, pueden llegar a emplearse. A continuación se hace una breve descripción de las características que presentan:

- **Ensayo de dureza Vickers.**
 - Emplea como penetrador una pieza con forma piramidal regular de base cuadrada, cuyas caras laterales forman un ángulo de 136° .
 - Las cargas aplicadas son más pequeñas que en el ensayo Brinell (de 1 a 120 kp), el tiempo de aplicación oscila entre los 10 y los 30 segundos y permite espesores en piezas de ensayo muy pequeños (0,2 mm.).
 - Este tipo de ensayos da valores muy parecidos a los ensayos Brinell hasta un valor de 300, a partir de aquí la dureza Vickers es superior a la Brinell, puesto que la deformación de la bola falsea los resultados.
- **Ensayos de dureza Rockwell.**
 - Se diferencia de los ensayos Brinell y Vickers, en que la medida de la dureza se hace en función de la huella y no de su superficie, además de ser menos preciso.

- Para materiales blandos el penetrador es una bola de acero de diámetro 1,5875 mm. y para materiales duros el penetrador es un cono de diamante de 120° en punta.

2.5.2. Relación de la humedad con la dureza y la densidad de la madera.

La madera, como cualquier otro material, presenta una serie de propiedades de cuyos valores depende su aptitud frente a los diferentes usos a los que pueda ser sometida. Pero con la madera existe una clara diferencia respecto a otros materiales con los que puede competir, y esta es, su relación con el agua.

Para referirnos a la humedad, haremos referencia a una peculiaridad que presenta la madera, la higroscopicidad. Esto es, la tendencia a retener cierta cantidad de agua, dependiente de las condiciones de temperatura y humedad ambiente. El grado de humedad que se pueda presentar en la madera, es el porcentaje en peso, del agua retenida en la madera respecto al de la madera anhidra.

El agua en la madera puede presentar de dos formas, bien impregnada en la pared celular, denominada agua ligada, o bien rellenando los huecos libres interiores de las células, llamado agua libre. Atendiendo a estos dos conceptos, se puede definir Punto de Saturación de las Fibras (PSF), como la máxima humedad que puede contener una madera sin que exista agua libre, cuyo valor oscila alrededor del 30%, pudiendo variar de unas especies a otras. Para humedades inferiores al PSF, la madera expuesta al aire pierde o gana humedad hasta alcanzar un punto de equilibrio llamado, Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH), el cual depende de las condiciones higrométricas del ambiente que rodea la pieza.

De esta forma, las variaciones de la cantidad de humedad que se produzcan en una misma pieza de madera, hace variar considerablemente la mayoría de sus propiedades físicas, como es la densidad, y mecánicas, como es la dureza. En general, las resistencias mecánicas disminuyen al aumentar la humedad desde el estado anhidro hasta el PSF. Los coeficientes de variación de la resistencia al variar un 1% la humedad en la madera, con relación a la existente al 12% de humedad, son del orden del 3% sobre la dureza, variable según especies (Casado Sanz y Acuña Rello, 2000).

Al referirnos a la densidad de la madera, lo haremos como consecuencia de que la madera es un material poroso, variando su densidad entre especies, árboles de la misma especie y entre partes del mismo árbol.

3. OBJETIVOS.

3. OBJETIVOS.

Para el presente estudio se fijan los siguientes objetivos:

3.1. Objetivo general.

- El objetivo general del proyecto no es otro que dar a conocer los valores de dureza que presentan cada una de las especies objeto de ensayo para cada uno de los métodos de ensayo planteados –a fuerza constante y a carrera constante- y para cada una de las seis condiciones higrotérmicas a las que han sido sometidas cada una de las especies, así como su densidad anhidra.

3.2. Objetivos específicos.

- Determinar la variación de la dureza para los ensayos de dureza a carrera constante (2 mm.) y fuerza constante (2 kN) con cada una de las variables objeto de estudio: densidad anhidra y humedad.
- Comparación de de la variación de durezas en función de cada una de las variables y entre especies.
- Determinar la relación de influencia de la densidad y de la humedad (por separado) en el factor objeto de análisis: dureza.
- Comparación de las dos tipos de durezas obtenidas para el conjunto de la muestra.
- Modelización de la influencia densidad+humedad en la dureza (para cada uno de los ensayos).

4. MATERIAL Y MÉTODOS.

Alumno: José María Roldán Rico
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación: Máster en Ingeniería de Montes

4. MATERIAL Y MÉTODOS.

4.1. Materiales empleados.

4.1.1. Probetas de madera.

4.1.1.1. Especies.

Para la realización del presente estudio, se ha contado con un total de 10 especies, todas ellas frondosas. Dichas especies son las que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.1. Código de identificación para las especies del estudio.

Código	Nombre común	Nombre científico	Tipo de especie
A	Acacia	<i>Robinia pseudoacacia</i> Linn.	F
Bu	Bubinga	<i>Guibourtia demeusei</i> J. León	F
Ca	Caoba	<i>Swietenia marcophylla</i> King.	F
C	Cerejeira	<i>Amburana caerensis</i> A. C. Smith	F
Ch	Chopo	<i>Populus canadensis</i> I-214	F
E	Etimoe	<i>Copaifera salikounda</i> Heck.)	F
J	Jatoba	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	F
Pl	Plátano	<i>Platanus acerifolia</i> Wild	F
T	Talí	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.	F
Ti	Tilo	<i>Tilia moltkei</i> Spaeth	F

4.1.1.2. Dimensiones.

El número de probetas de ensayo de cada especie ha sido de cinco, excepto para algunas especies y cajas donde se presentaban cuatro piezas. Las dimensiones, a su vez, también han sido variables, sin presentar diferencias desproporcionadas. En todas ellas se tomaron las medidas de ancho (a), largo (l) y alto (h), tal y como se muestra en la Figura 4.1.

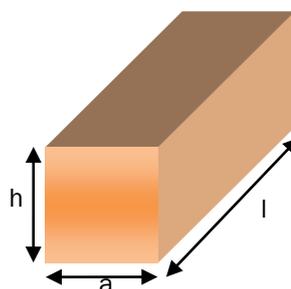


Figura 4.1. Dimensiones medidas para cada probeta.

4.1.2. Equipo de trabajo.

4.1.2.1. Cajas de ensayo

Con este nombre nos referimos a las cajas (ver Figura 4.2) donde hemos introducido una representación variable y equitativa de las probetas de cada especie y donde existían unas condiciones ambientales que favorecerían la absorción de la humedad creado en dicho ambiente por cada una de las probetas ensayadas.



Figura 4.2. Modelo de caja de ensayo.

En cada caja se presentaba un mallazo que permitía la separación de contacto directo de las piezas con la sustancia que daba origen a unas características ambientales de humedad relativa propias de cada caja. Las características que se presentaban en cada caja de ensayo son las que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.2. Humedades relativas para cada caja de ensayo.

Nº de caja	Sustancia química	Nomenclatura	HR (%)
1	Acetato potásico	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	23
2	Nitrato magnésico	CH_3COOK	52
3	Carbonato potásico	K_2CO_3	43
4	Cloruro sódico	$NaCl$	75,5
5	Hidróxido de sodio	$NaOH$	8,9
6	Nitrato de potasio	KNO_3	94

4.1.2.2. Calibre.

Este instrumento, también conocido como cartabón de corredera o pie de rey, es un instrumento para medir dimensiones de objetos relativamente pequeños, desde centímetros hasta fracciones de milímetros. Consta de una regla con una escuadra en un extremo, sobre la cual se desliza otra destinada a indicar la medida en una escala. Los valores de precisión que se dan en las medidas de las piezas analizadas, son de dos decimales.



Figura 4.3. Detalle del calibre.

4.1.2.3. Balanza.

Instrumento de medición que se caracteriza por su gran precisión. En nuestro caso hemos empleado una balanza digital de precisión de $\pm 0,001$ gr. El objetivo de su uso ha sido el de determinar el peso de las piezas una vez ensayadas con su correspondiente contenido de humedad y una vez que fueron secadas en la estufa, obteniendo así, el peso de la pieza en húmedo y el peso de la pieza en estado anhidro respectivamente.

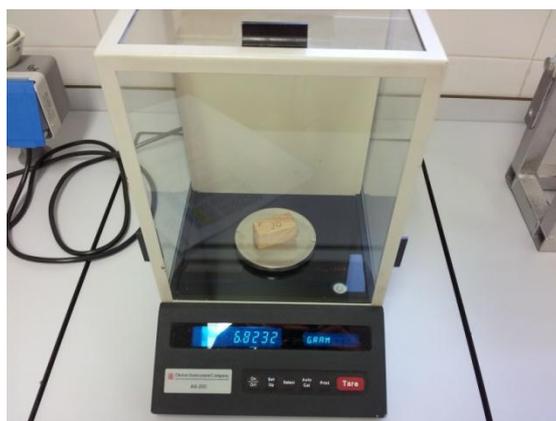


Figura 4.4. Detalle de la balanza digital durante el pesado de una probeta.

4.1.2.4. Estufa o cámara de secado.

Se trata de una cámara cuya construcción permite que en su interior se creen unas condiciones ambientales que consiguen un secado de la madera sin los riesgos del secado natural. Las probetas fueron introducidas en cámaras como la de la Figura 4.5, sometidas a una temperatura de $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un tiempo mínimo de 24 horas. Se trata de uno de los métodos más eficaces en el secado de madera, pero presenta como inconveniente su lentitud.



Figura 4.5. Estufa empleada para el secado de las probetas en laboratorio.

4.1.2.5. Desecador.

Se trata de un recipiente de vidrio que impide aislar las probetas de la humedad. Su tapa es de vidrio esmerilado para que el cierre sea hermético. En el fondo, contiene un agente deshidratante.

Este recipiente fue utilizado durante el trabajo de laboratorio (Figura 4.6) para almacenar las probetas después de pasar por la estufa para su posterior pesado, manteniendo así estado anhidro.



Figura 4.6. Desecador en laboratorio con probetas.

4.1.2.6. Máquina universal de ensayo.

Fabricada por IBERTEST, modelo ELIB-1000W (Figura 4.7), se trata de una máquina electromecánica que permite realizar ensayos universales, tales como los que se plantean para el presente estudio como son los ensayos de dureza, tanto a fuerza constante como a carrera constante.



Figura 4.7. Máquina de ensayos universales IBERTEST mod. ELIB-1000W.

Con esta máquina se permiten realizar multitud de ensayos sobre diferentes probetas determinando así sus características físico-mecánicas. Los resultados que se obtienen para cada uno de los ensayos se reflejan en el ordenador al que se encuentra conectada dicha máquina (Figura 4.8).



Figura 4.8. Monitor del ordenador unido a la máquina de ensayos.

A su vez, la máquina dispone de la capacidad de poder intercambiar el cabezal en función de la fuerza al que va ser sometida la pieza en cada ensayo determinado. En nuestro caso dispusimos en la máquina de un cabeza propio para trabajar a la fuerza de 2kN y carrera de 2 mm. (Figura 4.9), siendo un cilindro el objeto que iba a producir la penetración. Con el fin de evitar daños en la máquina ante cualquier despiste que pudiera surgir, esta dispone de unos sensores los cuales interrumpen el recorrido de la misma al entrar en contacto. (Figura 4.10).



Figura 4.9. Cabezal para ensayos de 2 KN de fuerza y y 2 mm. de carrera.

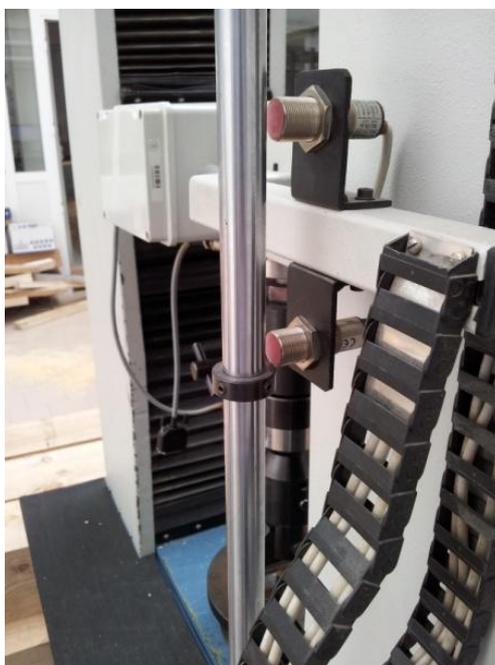


Figura 4.10. Sensores de seguridad.

4.2. Metodología.

El procedimiento previo de trabajo para obtener los valores de cada probeta y cada caja para su posterior análisis estadístico, comprendió la siguiente secuencia de operaciones.

4.2.1. Medición de las probetas.

Una vez realizados los ensayos correspondientes sobre cada una de las probetas, se procedía a su pesado en húmedo, secado y una vez alcanzado el estado anhidro en la estufa, se procedía a la medición de las piezas en longitud, anchura y altura.



Figura 4.11. Detalle de medición en longitud de una de las probetas.

4.2.2. Determinación del peso de las probetas.

La medición del peso de cada una de las probetas se realizó en el estado de humedad propio de cada caja y en su posterior estado anhidro tras su secado en estufa.

4.2.3. Realización de los ensayos de dureza

Se realizaron dos ensayos de dureza en cada pieza, uno a fuerza constante de 2 kN y paralelo al mismo, otro a carrera constante de 2 mm. El proceso fue repetido para cada una de las probetas.

Para ambos ensayos se empleó el método de ensayo de Monnin, propuesto por la norma UNE 56534, cuya pieza de indentación es un cilindro (Figura 4.12).

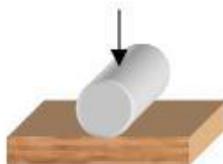


Figura 4.12. Ensayo de Monnin o Chalais Meudon.

4.2.3.1. Ensayos de dureza a carrera constante (2mm.).

Con este ensayo se pretende determinar la fuerza necesaria para profundizar 2 mm. en la madera. Dicha fuerza se aplicaba perpendicular a los anillos de crecimiento, actuando sobre una superficie de características lo más homogéneas posibles. El proceso de trabajo consistía en programar la máquina para que el cabezal profundizase en la madera durante 10 segundos hasta alcanzar la profundidad de 2 mm. para posteriormente mantenerse en dicha posición durante 5 segundos.

En este proceso lo que se trata es determinar la fuerza necesaria que la máquina tenía que ejercer para dejar una huella de 2 mm. en la probeta de madera y posteriormente obtener los valores de dureza para cada especie y caja.

4.2.3.2. Ensayos de dureza a fuerza constante (2 kN).

Paralelamente a ensayo de dureza a carrera constante, se procedería a realizar el mismo ensayo pero a fuerza constante. Este ensayo consiste en someter a cada una de las probetas de cada caja a un ensayo de dureza en el que se les aplicaba una fuerza constante de 2 kN de forma perpendicular a la pieza y los anillos de crecimiento –con el fin de buscar la estructura más homogénea posible de cada probeta de madera-. El proceso de trabajo de la máquina en el ensayo consistía en hacer penetrar el cabezal en la pieza de la madera, durante un tiempo de 10 segundos hasta alcanzar una fuerza máxima de 2 kN y manteniendo dicha fuerza durante 5 segundos.

Tras dicho proceso, el cabezal recorrería una distancia que es la que nos permitiría posteriormente hacer los cálculos para obtener los valores de dureza para cada especie y caja.

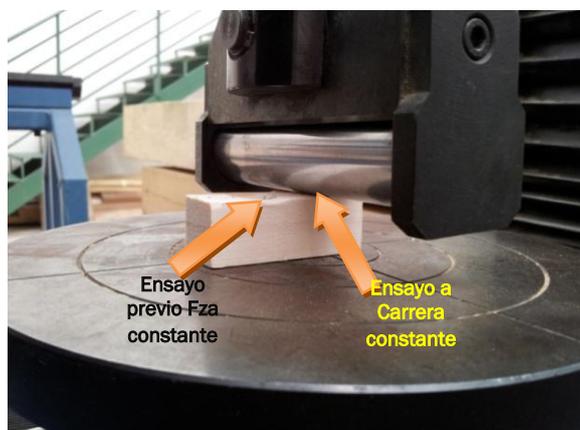


Figura 4.13. Ensayo de dureza a carrera constante sobre una pieza de chopo.

4.2.4. Determinación de la humedad.

El procedimiento llevado a cabo para la determinación de la humedad de cada probeta es muy similar al del **Norma UNE 56.529**. Tras pesarse la probeta en una balanza con precisión de 0,001 g, se introduce en la estufa donde se seca a 103°C. A las 24 horas se saca de la estufa y se introduce en el desecador, para su posterior peso en estado anhidro.

En nuestro caso, los obtenidos de humedad variarán, puesto que se disponía de seis cajas con humedades relativas diferentes.

4.3. Cálculo de propiedades físicas y mecánicas.

4.3.1. Densidad.

Para la determinación de la densidad de cada probeta (**Norma UNE 56.531**), se empleará la relación de entre los diferentes pesos anhidros de las probetas y sus correspondientes volúmenes, los cuales vendrán determinados por las mediciones de las dimensiones de las probetas, las cuales serán variables en algunos casos. La expresión de dicha relación es la siguiente:

$$\varphi = \frac{Pa}{a \times l \times h} = \frac{Pa}{V}$$

donde Pa es el peso anhidro de la probeta, a , l y h las dimensiones de la probeta – ancho, largo y alto respectivamente-.

4.3.2. Humedad.

Tras la desecación en estufa de las probetas según la **Norma UNE 56.529**, para la determinación del contenido de humedad exacto respecto de su estado anhidro, se utilizará la siguiente expresión:

$$H (\%) = \frac{P1 - P2}{P2} \times 100$$

donde H es la humedad en porcentaje del peso anhidro, $P1$ el peso inicial de la probeta en gramos y $P2$ el peso de la probeta en gramos después de su desecación o estado anhidro.

4.3.3. Dureza.

Para el cálculo de la dureza, se empleó la siguiente expresión, donde en un caso el factor fijo sería la fuerza y en otro la carrera. Dicha expresión es:

$$D = \frac{F}{S}; [\text{N/mm}^2]$$

donde F es la fuerza y S la sección.

A partir de la Figura 4.13, y en base a la **Norma 56-534-77**, vamos a desarrollar el procedimiento de cálculo:

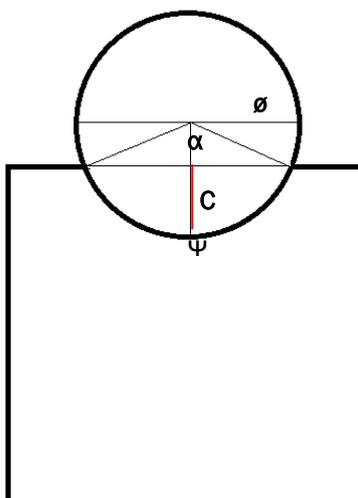


Figura 4.13. Representación de la indentación del cilindro en una probeta de madera.

Para la determinación de la sección de la huella del cilindro, es preciso determinar en primer lugar el ángulo de incidencia α , para lo cual se emplea la siguiente expresión:

$$\alpha = 2 \arccos \left(\frac{15 - C}{15} \right)$$

donde C es la carrera.

y posteriormente es preciso calcular el arco ψ correspondiente a dicho ángulo, lo cual se realiza mediante la expresión:

$$\psi = 15 \times \alpha$$

Calculado el ángulo y el arco, la superficie S de la sección generada por el cilindro se calcula mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{L \times \psi}{100}$$

dónde L , es la anchura (mm.) de la pieza en la cara de acción del cilindro y ψ es el arco de la huella originada por el cilindro sobre la probeta.

4.4. Tratamiento estadístico de los datos.

Para llevar a cabo esta parte del trabajo de forma ordenada, se recogieron los diferentes datos de los ensayos por caja y especie en una tabla elaborada a partir del software "Excel 2007". Una vez esto, se procedió a introducir la formulación antes empleada para obtener los diferentes valores de las propiedades físicas y mecánicas.

A continuación se exportó dicha tabla al software "STATGRAPHICS CENTURION XV versión 15.2.06" con el que podremos realizar una gran variedad de análisis estadísticos.

El primer paso para llevar a cabo el análisis de datos, una vez introducidos los mismos, es realizar un análisis descriptivo de la muestra. Este análisis nos permitirá controlar la presencia de posibles errores en la fase de introducción de los datos, es decir, detectaremos con él valores fuera de rango, o la presencia de valores perdidos. Este análisis inicial también nos proporcionará una idea de la forma que tienen los datos.

En segundo lugar se realizarán comparaciones entre las diferentes muestras utilizando distintas técnicas estadísticas. En aquellas en las que se cumpla con las exigencias de normalidad, homocedasticidad e independencia, utilizaremos ANOVA, en otros casos utilizaremos una técnica no paramétrica como es el test de Kruskal-Wallis.

En tercer lugar, y como último paso, se realizará un análisis predictivo, mediante el empleo de técnicas de regresión lineal.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Alumno: José María Roldán Rico
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación: Máster en Ingeniería de Montes

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Análisis descriptivo.

En esta primera parte del análisis quedan recogidos los resultados sobre la determinación de la densidad anhidra para cada una de las especies a partir de las humedades de cada caja y el comportamiento de la dureza para cada uno de los dos métodos en función de la humedad, para cada especie y caja ensayada, todo ello de manera muy generalizada con el fin de dar un primer enfoque global al análisis de las variables objeto de estudio.

A continuación se detallan los resultados obtenidos para cada uno de estos análisis.

5.1.1. Determinación de la variación de densidades anhidra para cada especie.

A partir de las humedades presentes en cada caja se determinó el valor medio de la densidad anhidra para cada una de las especies con las que se ha trabajado en el presente estudio, tal y como recoge la Tabla 5.1. En dicha tabla es posible observar como las especies más densas son Bubinga, Jatoba y Talí, y como era de esperar, especies como Chopo y Talí, las que menor densidad anhidra presentan.

Tabla 5.1. Valores de densidad anhidra para el conjunto de para cada especie.

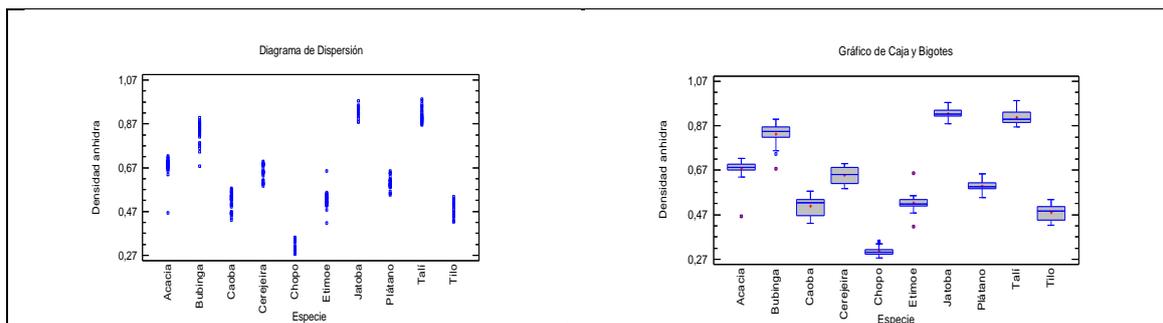
Especie	Datos		
	n ⁽¹⁾	\bar{x} ⁽²⁾	CV(%) ⁽³⁾
Acacia	30	0,678231	6,57297
Bubinga	30	0,833071	5,86407
Caoba	30	0,510154	8,14562
Cerejeira	30	0,64751	5,52304
Chopo	30	0,306631	6,67998
Etimoe	30	0,523345	7,01563
Jatoba	30	0,925701	2,35249
Plátano	30	0,599616	4,57649
Talí	30	0,909583	3,48879
Tilo	22	0,480329	7,7494

⁽¹⁾Número de probetas de cada especie totales.

⁽²⁾Valores medios de densidad anhidra para cada especie, (gr/cm³).

⁽³⁾Coefficiente de variación para la media indicada.

En la Figura 5.1, se puede observar la distribución de los valores obtenidos de cada especie para la densidad anhidra, así como la representación de los diagramas de cajas de los mismos y lo comentado para la Tabla 5.1. Además, en el gráfico de caja de bigotes, se puede determinar, a priori, como Bubinga, Jatoba y Talí, muestran diferencias significativas con el resto de especies, al no existir superposición de intervalos entre ellas.



Figuras 5.1. Representación gráfica de la densidad anhidra resultante para cada una de las especies de madera.

5.1.2. Determinación de la relación entre la humedad y la dureza

- **Variación de la dureza (carrera constante) con la humedad para cada especie.**

Este análisis refleja el comportamiento que tiene la dureza de la madera a partir de su contenido de humedad, para el ensayo a carrera constante. Si observamos la Tabla 5.2, encontramos los valores medios de dureza para el ensayo a carrera constante, para el total de las muestras que había presentes en cada una de las cajas, en las que se recreaban ambientes diferentes de humedad. A priori, y de manera muy general, es posible observar como la dureza media, aparentemente va disminuyendo a medida que va aumentando la humedad, pero manteniendo cierta constancia para los valores centrales de humedad, para cada una de las especies, y mostrándose unos valores más bajos en aquellas especies que presentan menor densidad, y viceversa.

Estos resultados se recogen de manera gráfica en la Figura a.1 del anexo correspondiente al análisis, quedando representados mediante los gráficos de dispersión y caja de bigotes, siendo posible observar la tendencia comentada en el párrafo anterior.

Tabla 5.2. Valores de dureza (carrera constante) para cada especie en función de la humedad.

Especies	Humedades (%)								
	8,9			23			43		
	n ⁽¹⁾	\bar{x} ⁽²⁾	CV(% ⁽³⁾)	n	\bar{x}	CV(%)	n	\bar{x}	CV(%)
Acacia	5	14,7951	2,94057	5	11,9748	6,54371	5	12,2518	5,6212
Bubinga	5	20,4694	10,9895	5	16,6233	12,4115	5	18,4333	5,84276
Caoba	5	12,4208	17,3593	5	9,72079	10,4794	5	9,20034	14,9523
Cerejeira	5	11,9988	7,77722	5	11,8616	4,79287	5	11,4536	6,46993
Chopo	5	4,0939	6,39259	5	3,81449	11,9976	5	3,43713	7,74137
Etimoe	5	9,52161	12,1098	5	8,26713	7,62017	5	9,20504	7,1069
Jatoba	5	26,3506	8,51854	5	23,5469	7,69905	5	25,6843	3,67814
Plátano	5	9,65422	12,0249	5	9,06957	7,34882	5	8,5595	3,1594
Talí	5	23,2082	9,87453	5	18,3552	9,56205	5	18,1654	7,44688
Tilo	3	5,87171	10,9828	4	5,58233	5,18776	4	6,10125	3,09236

⁽¹⁾Número de probetas de cada especie para cada humedad.

⁽²⁾Valores medios de la dureza (carrera constante) para cada especie en función de la humedad.

⁽³⁾Coefficiente de variación para la media indicada.

Tabla 5.2 (continuación). Valores de dureza (carrera constante) para cada especie en función de la humedad.

Especies	Humedades (%)								
	52			75,5			94		
	n	\bar{x}	CV(%)	n	\bar{x}	CV(%)	n	\bar{x}	CV(%)
Acacia	5	11,472	9,98337	5	11,3058	6,15464	5	8,46369	16,3852
Bubinga	5	14,4534	14,722	5	15,0483	4,72054	5	3,21902	17,6238
Caoba	5	8,08593	17,3097	5	8,85858	6,98752	5	6,40755	27,3722
Cerejeira	5	10,3537	6,07935	5	10,6641	6,84674	5	5,93221	7,65962
Chopo	5	3,07816	19,3172	5	3,03695	9,83308	5	1,45403	29,927
Etimoe	5	7,46949	8,81748	5	7,47253	14,3345	5	3,16864	11,3291
Jatoba	5	21,8683	4,69523	5	24,102	5,5153	5	7,44389	11,7444
Plátano	5	7,8712	6,84221	5	8,79308	9,95188	5	3,30132	8,11717
Talí	5	16,2066	5,42328	5	15,9185	9,39996	5	1,90582	80,8266
Tilo	4	4,01343	4,48437	4	3,975	5,59277	3	1,02559	23,7264

▪ **Variación de la dureza (fuerza constante) con la humedad por especies y cajas.**

En esta parte del análisis, se desarrollan nuevamente los resultados obtenidos para los ensayos de dureza a fuerza constante para cada especie y caja ensayadas. Nuevamente en la Tabla 5.3 quedan recogidos los valores de dichos resultado. De manera muy general y del mismo modo que para el ensayo a carrera constante, es posible observar como la dureza media, aparentemente va disminuyendo a medida que va aumentando la humedad contenida en las diferentes cajas, manteniendo una cierta constancia para los valores centrales de humedad, para cada una de las especies. Es posible observar nuevamente unos valores más bajos de dureza media en aquellas especies que presentan menor densidad, y viceversa.

Estos resultados se recogen de manera gráfica en la Figura a.2 del anexo correspondiente al análisis, quedando representados mediante los gráficos de dispersión y caja de bigotes, y pudiendo observar lo comentado anteriormente para el presente análisis.

Tabla 5.3. Valores de dureza (fuerza constante) para cada especie en función de la humedad.

Especies	Humedades (%)								
	8,9			23			43		
	n ⁽¹⁾	\bar{x} ⁽²⁾	CV(%) ⁽³⁾	n	\bar{x}	CV(%)	n	\bar{x}	CV(%)
Acacia	5	7,90231	2,94724	5	7,7456	2,31227	5	7,7046	2,12663
Bubinga	5	7,80742	1,0867	5	7,49396	2,33532	5	7,99164	4,49067
Caoba	5	7,6515	4,60058	5	7,20521	3,40952	5	7,0621	6,92088
Cerejeira	5	7,29004	3,38413	5	7,32029	3,31145	5	7,14325	3,41801
Chopo	5	5,27431	5,89533	5	5,14117	7,28907	5	4,66717	5,24033
Etimoe	5	6,90122	1,17605	5	6,8106	2,07758	5	6,8246	2,76755
Jatoba	5	8,34535	1,94426	5	8,02147	1,88399	5	7,82264	2,86954
Plátano	5	7,12412	1,56926	5	7,08555	0,893271	5	6,81865	1,56202
Talí	5	7,92273	7,17571	5	7,57241	2,67795	5	7,73007	3,51436
Tilo	3	6,36186	5,66243	4	6,19829	1,48233	4	6,28095	6,85662

⁽¹⁾Número de probetas de cada especie para cada humedad.

⁽²⁾Valores medios de la dureza (fuerza constante) para cada especie en función de la humedad.

⁽³⁾Coefficiente de variación para la media indicada.

Tabla 5.3 (continuación). Valores de dureza (fuerza constante) para cada especie en función de la humedad.

Especies	Humedades %								
	52			75,5			94		
	n	\bar{x}	CV(%)	n	\bar{x}	CV(%)	n	\bar{x}	CV(%)
Acacia	5	8,09586	5,74694	5	7,65858	6,12154	5	7,25893	7,81361
Bubinga	5	7,17322	2,28267	5	7,29487	2,36533	5	7,06921	4,57884
Caoba	5	6,72509	4,36867	5	6,86287	7,28549	5	6,39989	5,40417
Cerejeira	5	6,90065	3,26305	5	6,74401	3,19166	5	6,6283	1,1807
Chopo	5	4,61159	8,15443	5	4,03231	9,79862	5	3,60132	16,8289
Etimoe	5	6,54579	2,66314	5	6,34143	2,4713	5	5,951	3,73491
Jatoba	5	7,81228	2,20211	5	7,98976	1,36251	5	7,82799	2,97231
Plátano	5	6,6355	1,29278	5	6,64295	1,52975	5	6,00967	1,28429
Talí	5	7,7594	5,48761	5	7,43141	6,42062	5	7,05307	2,85718
Tilo	4	5,67967	2,14887	4	5,3272	5,86327	3	3,32172	5,3173

Debido a que el material con el que estamos trabajando, presenta un comportamiento muy heterogéneo bajo las condiciones de humedad que le rodean, en algunos ensayos se determinó no tenerse en cuenta la última de las cajas, con un contenido de humedad del 94%, ya que los valores obtenidos eran muy atípicos, o incluso nulos. La elevada humedad contenida en dicha caja hizo que las probetas rompiesen al mínimo contacto con la pieza de indentación colocada en la máquina, y en algunos casos haciendo saltar el sensor de seguridad, como consecuencia de un alto reblandecimiento de la misma.

Además, dicho contenido de humedad ofrece un coeficiente de variación muy alto para dicha caja, lo que puede dar lugar a un aumento de las variabilidades para el resto de especies.

5.2. Análisis comparativo

Con este apartado se pretende comparar las variables, densidad y humedad, entre las diferentes especies estudiadas y determinar si existen diferencias entre ellas y si son realmente significativas, con un nivel del 95,0% de confianza, prescindiendo de la caja 6.

En primer lugar se comprobará que se cumplen las condiciones de normalidad, independencia y homocedasticidad, esta última mediante la verificación de la igualdad de varianzas (Test de Levene's), para posteriormente utilizar bien la prueba de Kruskal-Wallis o bien el análisis ANOVA.

Posteriormente, nos fijaremos en la prueba de rango múltiple de Turkey, ya que a través de los grupos homogéneos se obtendrá información sobre de la comparación de las variables densidad o humedad de cada pieza en cada caso, determinando cuáles medias son significativamente diferentes de otras. Con este método hay un riesgo del 5% de decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0.

Además, es posible hacer una comparación por parejas, a modo de orientación, observando límites superiores e inferiores entre las distintas especies para afirmar cuales podrían ser similares.

5.2.1. Comparación de la densidad anhidra entre especies.

En este apartado del análisis se pretende determinar la igualdad o diferencias que puedan existir entre las densidades anhidras de las especies con las que se ha trabajado en el presente estudio. Si observamos los valores de la Tabla 5.5, se obtiene un p-valor superior a 0,05, de tal forma que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar con un nivel del 95% de confianza.

Tabla 5.5. Valores de la verificación de la varianza.

	Prueba	Valor-p
Levene's	1,5093	0,145331

La prueba ANOVA, Tabla 5.6, ofrece un p-valor inferior a 0,05, existiendo por tanto una **diferencia estadísticamente significativa** entre los valores de las medias con una confianza del 95%.

Tabla 5.6. Valores ANOVA para la densidad anhidra.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	8,86293	9	0,984769	1020,22	0,0000
Intra grupos	0,225869	234	0,000965253		
Total (Corr.)	9,08879	243			

La representación gráfica de valores medios con un intervalo de confianza del 95% se muestran en la Figura 5.2.

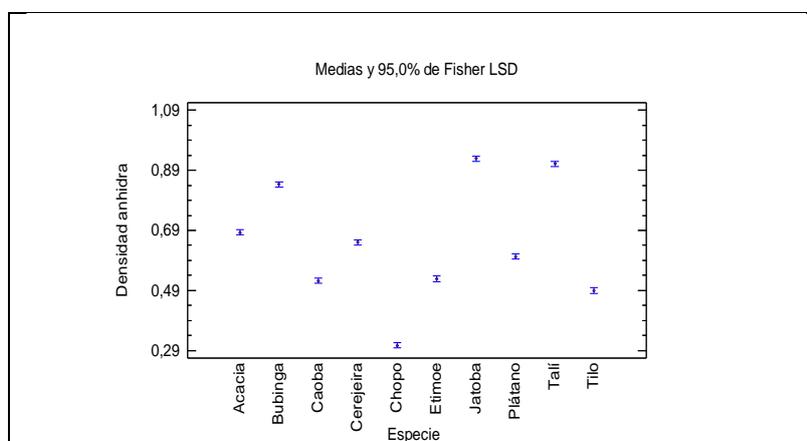


Figura 5.2. Representación gráfica de los valores de la media para la dureza a carrera constante.

En la Tabla 5.7 se determina, a través de la prueba múltiple de Turkey HSD los valores de la media de densidad anhidra por especie y los grupos homogéneos, con el fin de determinar que medias son significativamente diferentes. Al observar la columna de los grupos homogéneos, se puede determinar que aquellas especies que comparten una misma columna de X, no presentan diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 5.7. Valores de la prueba de múltiples rangos de Turkey HSD para densidad anhidra por especie.

Especie	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Chopo	25	0,307312	x
Tilo	19	0,488855	x
Caoba	25	0,521738	x
Etimoe	25	0,528954	x
Plátano	25	0,602706	x
Cerejeira	25	0,650736	x
Acacia	25	0,68388	x
Bubinga	25	0,842677	x
Talí	25	0,911503	x
Jatoba	25	0,928123	x

Si observamos los valores de los límites de los intervalos de confianza de la Tabla 5.8, se puede establecer que para aquellas parejas de especies en las que se superponen dichos límites, no existen diferencias significativas entre sus densidades anhidras, como es el caso de Talí y Jatoba

Tabla 5.8. Intervalos de confianza al 95%.

Especie	Casos	Límite Inferior	Límite Superior
Acacia	25	0,675223	0,692536
Bubinga	25	0,834021	0,851333
Caoba	25	0,513082	0,530395
Cerejeira	25	0,642079	0,659392
Chopo	25	0,298655	0,315968
Etimoe	25	0,520298	0,53761
Jatoba	25	0,919467	0,936779
Plátano	25	0,59405	0,611362
Talí	25	0,902847	0,920159
Tilo	19	0,478925	0,498785

5.2.2. Comparación de la dureza (carrera constante) entre especies.

En la Tabla 5.9, se realiza una verificación de la varianza, donde el p-valor muestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar con un nivel del 95% de confianza. Dicho valor es tan pequeño, que en esta nos permite realizar un ANOVA.

Tabla 5.9. Valores de la verificación de la varianza.

	Prueba	Valor-P
Levene's	6,59872	2,15363E-8

En la Tabla 5.6, se puede observar que la prueba de Kruskal-Wallis, ofrece un p-valor inferior a 0,05, lo que determina que **existen diferencias significativas** entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

Tabla 5.10. Valores de la prueba de Kruskal-Wallis para la dureza (carrera constante) por especie.

Especie	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Acacia	25	148,08
Bubinga	25	190,0
Caoba	25	99,32
Cerejeira	25	132,92
Chopo	25	14,72
Etimoe	25	75,04
Jatoba	25	229,64
Plátano	25	81,68
Talí	25	199,08
Tilo	19	33,0526

Estadístico = 224,904 Valor-P = 0,0

La representación gráfica de lo anteriormente comentado para la Tabla 5.10, se puede observar en la figura 5.3.

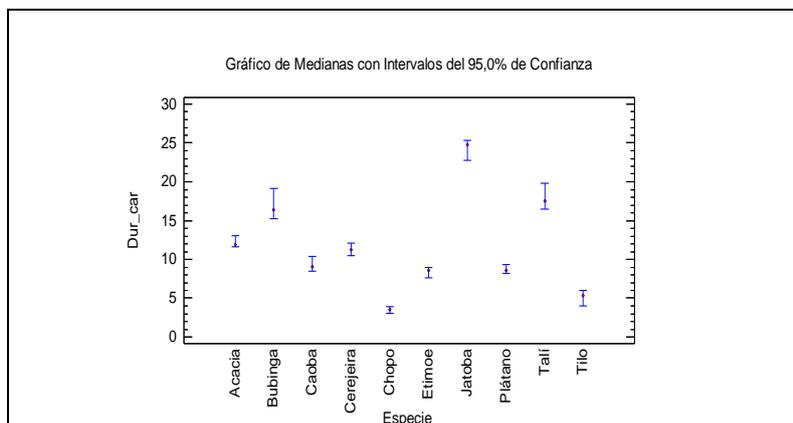


Figura 5.3. Representación gráfica de los valores de la mediana para la dureza a carrera constante.

Al observar los grupos homogéneos de la Tabla 5.11, se puede determinar, a priori, que todas aquellas especies que tengan sobre la misma columna una X, presentan unos valores de densidad anhidra significativamente similares.

Tabla 5.11. Valores de la prueba de múltiples rangos de Turkey HSD para dureza (carrera constante) por especie.

Especie	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Chopo	25	3,49213	X
Tilo	19	5,06859	X
Etimoe	25	8,38716	X
Plátano	25	8,78952	X
Caoba	25	9,65729	XX
Cerejeira	25	11,2664	XX
Acacia	25	12,3599	X
Bubinga	25	17,0055	X

Tabla 5.11 (continuación). Valores de la prueba de múltiples rangos de Turkey HSD para dureza (carrera constante) por especie.

Especie	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Talí	25	18,3708	X
Jatoba	25	24,3104	X

Al observar los límites de los intervalos de confianza que aparecen en la Tabla 5.12, se puede determinar que parejas de especies son similares significativamente, al superponerse los valores de límite superior e inferior de las medias. De esta forma se puede decir que las parejas de especie, Plátano y Etimoe y Plátano y Caoba no muestran diferencias significativas en sus valores de dureza para el ensayo a carrera constante.

Tabla 5.12. Intervalo de confianza al 95%.

Especie	Casos	Límite Inferior	Límite Superior
Acacia	25	11,8557	12,8641
Bubinga	25	16,5013	17,5097
Caoba	25	9,1531	10,1615
Cerejeira	25	10,7622	11,7706
Chopo	25	2,98794	3,99632
Etimoe	25	7,88297	8,89135
Jatoba	25	23,8062	24,8146
Plátano	25	8,28532	9,29371
Talí	25	17,8666	18,875
Tilo	19	4,49024	5,64694

5.2.3. Comparación de la dureza (fuerza constante) entre especies.

En la Tabla 5.13, se realiza una verificación de la varianza, donde el p-valor muestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar con un nivel del 95% de confianza. Dicho valor es tan pequeño, que en esta nos permite realizar un ANOVA.

Tabla 5.13. Valores de la verificación de la varianza.

	Prueba	Valor-P
Levene's	2,54037	0,0084558

En la Tabla 5.14, se puede observar que la prueba de Kruskal-Wallis, ofrece un p-valor inferior a 0,05, lo que determina que **existen diferencias significativas** entre las medianas con un nivel del 95% de confianza.

Tabla 5.14. Valores de la prueba de Kruskal-Wallis para la dureza (fuerza constante) por especie.

Especie	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Acacia	25	194,48
Bubinga	25	167,8
Caoba	25	120,36
Cerejeira	25	115,16
Chopo	25	13,72
Etimoe	25	73,92
Jatoba	25	212,6
Plátano	25	91,24
Talí	25	178,4
Tilo	19	36,7368

Estadístico = 197,197 Valor-P = 0,0

La representación gráfica de lo anteriormente comentado para la Tabla 5.14, se puede observar en la Figura 5.4.

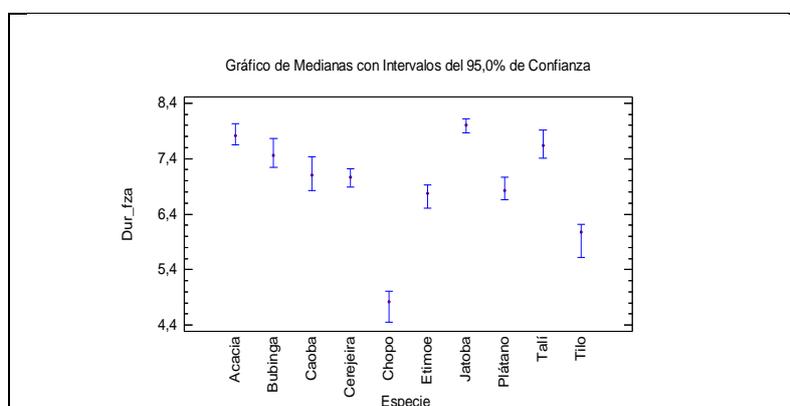


Figura 5.4. Representación gráfica de los valores de la mediana para la dureza a fuerza constante.

Al observar los grupos homogéneos de la Tabla 5.15, se puede determinar, a priori, que todas aquellas especies que tengan sobre la misma columna una X, presentan unos valores de densidad anhidra significativamente similares.

Tabla 5.15. Valores de la prueba de múltiples rangos de Turkey HSD para dureza (carrera constante) por especie.

Especie	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Chopo	25	4,74531	X
Tilo	19	5,92263	X
Etimoe	25	6,68473	X
Plátano	25	6,86135	XX
Cerejeira	25	7,07965	X
Caoba	25	7,10135	X
Bubinga	25	7,55222	X
Talí	25	7,6832	XX
Acacia	25	7,82139	XX
Jatoba	25	7,9983	X

Al observar los límites de los intervalos de confianza que aparecen en la Tabla 5.16, se puede determinar que parejas de especies son similares significativamente, al superponerse los valores de límite superior e inferior de las medias. De esta forma se puede decir que las parejas de especie, caoba y cerejeira y tali, buginga y acacia no muestran diferencias significativas en sus valores de dureza media para el ensayo a carrera constante.

Tabla 5.16. Intervalos de confianza al 95%.

Especie	Casos	Límite Inferior	Límite Superior
Acacia	25	7,71637	7,92641
Bubinga	25	7,4472	7,65724
Caoba	25	6,99633	7,20637
Cerejeira	25	6,97463	7,18467
Chopo	25	4,64029	4,85033
Etimoe	25	6,57971	6,78975
Jatoba	25	7,89328	8,10332
Plátano	25	6,75633	6,96637
Talí	25	7,57818	7,78822
Tilo	19	5,80216	6,0431

5.3. Análisis predictivo.

A la vista de los resultados que hemos estado teniendo, parece lógico pensar que la dureza, como propiedad física, depende de dos variables esencialmente, la humedad y la dureza.

5.3.1. Variación de la dureza con la humedad.

- **Variación de la dureza a carrera constante en función de la humedad.**

A fin de determinar el comportamiento que toma dureza para el ensayo a carrera constate que mostraban las especies en relación con la humedad, se procedió a realizar un análisis de regresión.

Tal y como se muestran los valores en la Tabla 5.16, se puede observar como la dureza se ajustaba a un comportamiento que se asimila a la **función cuadrado de X**. Dichas funciones demuestran un comportamiento bastante bueno, con elevados valores en el coeficiente de determinación, excepto la caoba, que presenta un valor inferior al resto de especies. Los resultados del p-valor, determinan una validez de los resultados claramente significativos.

Además se puede observar como el valor del coeficiente de correlación es próximo a -1, lo que indica que la función decrece hacia la izquierda en todos los casos, cumpliéndose que a mayor humedad menor dureza.

Tabla 5.16. Valores de la función cuadrado de X para cada especie.

Especies	Datos				
	a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ⁽⁴⁾	p-valor ANOVA
Acacia	13,3089	-0,0145475	-0,8018	64,28	0,0000
Bubinga	19,5201	-0,035686	-0,9311	86,70	0,0000
Caoba	10,778	-0,0144695	-0,6682	44,65	0,0001
Cerejeira	12,4589	-0,0199007	-0,9440	89,12	0,0000
Chopo	3,95894	-0,00605723	-0,9072	82,31	0,0000
Etimoe	9,60893	-0,0153998	-0,9050	81,89	0,0000
Jatoba	28,6148	-0,0712613	-0,8607	74,08	0,0000
Plátano	9,78365	-0,0172585	-0,9063	82,15	0,0000
Talí	22,1515	-0,0595015	-0,9513	90,51	0,0000
Tilo	5,80174	-0,0113561	-0,9256	85,68	0,0000

(1) y (2) Intercepto y pendiente de la función $y=a+bx^2$.

(3) Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

En la Figura 5.5 se muestra la representación gráfica que adquiere la variación de la dureza a carrera constante en función de la humedad para cada una de las especies.

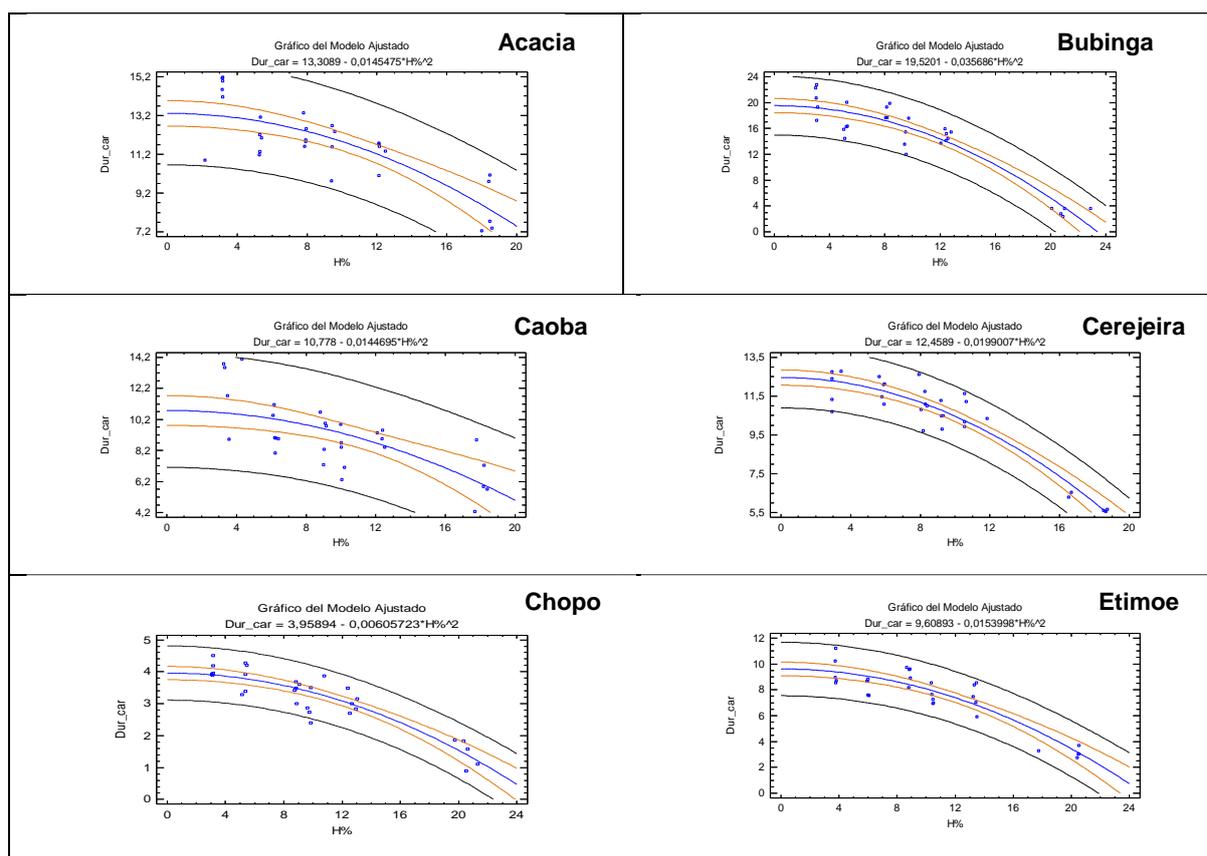


Figura 5.5. Comportamiento de la dureza (carrera constante) de cada especie en función de la humedad.

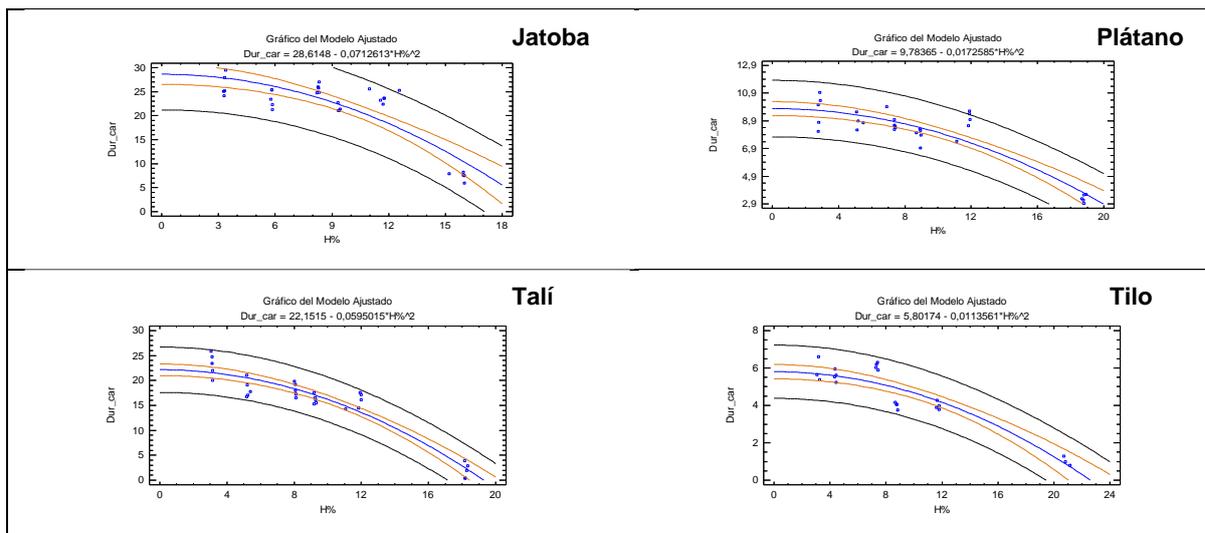


Figura 5.5 (Continuación). Comportamiento de la dureza (carrera constante) de cada especie en función de la humedad.

▪ **Variación de la dureza a fuerza constante en función de la humedad.**

Nuevamente, para determinar el comportamiento que toma dureza para el ensayo a fuerza constante que mostraban las especies en relación con la humedad, se procedió a realizar una análisis de regresión.

En los valores que se presentan en la Tabla 5.17, se puede observar como el comportamiento de la dureza se asimila de nuevo a la **función cuadrado de X**. Los valores del coeficiente de correlación múltiple, son para las especies de Etimoe, plátano y tilo, los más altos, mientras que en el resto de especies se toman valores considerablemente más bajos.

Aún así, los resultados del p-valor, determinan una validez de los resultados claramente significativos.

Además se puede observar como el valor de la correlación es próximo a -1, lo que indica que la función decrece hacia la derecha en todos los casos, y estableciéndose la relación de que a mayor humedad menor dureza ofrecen las especies.

Tabla 5.17. Valores de la función cuadrado de X para cada especie.

Especies	Datos				
	a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ⁽⁴⁾ %	p-valor ANOVA
Acacia	7,93708	-0,00190617	-0,4997	24,98	0,0049
Bubinga	7,67446	-0,0015034	-0,5694	32,42	0,0010
Caoba	7,32976	-0,00300583	-0,5977	37,72	0,0005
Cerejeira	7,32132	-0,00216926	-0,6788	46,08	0,0000
Chopo	5,08204	-0,00396103	-0,7961	63,38	0,0000
Etimoe	6,90804	-0,00244463	-0,9062	82,13	0,0000

⁽¹⁾ y ⁽²⁾ Intercepto y pendiente de la función $y=a+bx^2$.

⁽³⁾ Correlación.

⁽⁴⁾ Coeficiente de determinación

Tabla 5.17 (Continuación). Valores de la función cuadrado de X para cada especie.

Especies	Datos				
	a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ⁽⁴⁾ %	p-valor ANOVA
Jatoba	8,09844	-0,0012872	-0,4139	17,13	0,0230
Plátano	7,05832	-0,00306425	-0,9350	87,42	0,0000
Talí	7,84107	-0,0023973	-0,5819	33,87	0,0007
Tilo	6,36806	-0,007007371	-0,9804	95,06	0,0000

(1) y (2) Intercepto y pendiente de la función $y=a+bx^2$.

(3) Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

En la Figura 5.6 se muestra la representación gráfica que adquiere la variación de la dureza a fuerza constante en función de la humedad para cada una de las especies

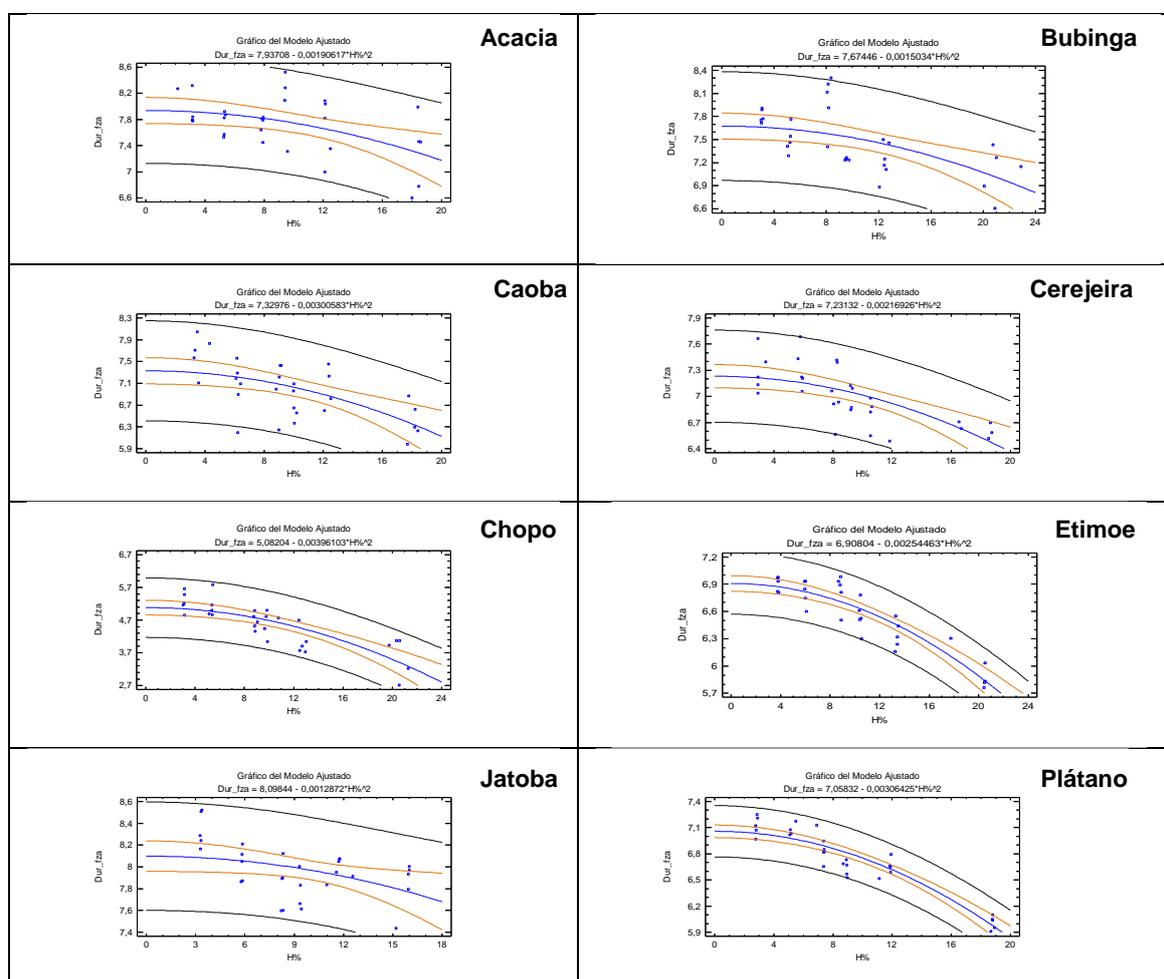


Figura 5.6. Comportamiento de la dureza (fuerza constante) de cada especie en función de la humedad.

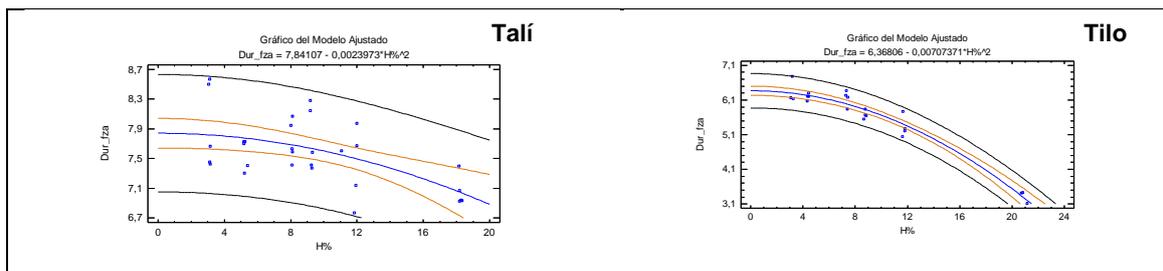


Figura 5.6 (continuación). Comportamiento de la dureza (fuerza constante) de cada especie en función de la humedad.

5.3.2. Comparación de la dureza entre especies, a carrera constante, en función de la humedad.

Para llevar a cabo este análisis, se procedió a realizar una comparación de líneas de regresión. Para comparar líneas de regresión, resulta útil e indispensable, transformar los valores, que en nuestro caso respondían a la función cuadrado de X, a funciones lineales. Esta transformación se realiza tanto para la variación de la dureza carrera constante como a fuerza constante, en función de la humedad.

Para ello, la variable x^2 , la pasamos a llamar z, y este término se corresponde con el factor humedad elevado al cuadrado ($H\%^2$). De esta forma transformamos las líneas de regresión en rectas, lo cual nos permite su comparación.

Proceso de transformación

$$y = a + bx^2 \text{ (cuadrado de } x) \longrightarrow y = a + bz \text{ (modelo lineal)}$$

- **Determinación de los modelos lineales de las funciones cuadrado de X transformadas.**

Los resultados de este análisis, que se muestran en la Tabla 5.18, muestran los valores para los términos a y b, correspondiente a la función lineal transformada, los coeficientes de correlación y el coeficiente de determinación (R^2 ajustado) y el p-valor.

Observamos los valores del coeficiente de correlación múltiple, podemos afirmar que el modelo se ajusta bastante bien, y podemos dar por válido dicho modelo. Esto queda confirmado por los valores que toma p-valor, los cuales muestran una validez estadísticamente significativa.

Los resultados de correlación para cada especie son elevados tomando un valor negativo, lo que indica una linealidad decreciente hacia la derecha., donde un incremento de la humedad supone una disminución de la dureza.

Tabla 5.18. Valores de la función lineal para cada especie.

Especies	Datos				
	a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ⁽⁴⁾	p-valor ANOVA
Acacia	13,3089	-0,0145475	-0,8018	64,28	0,0000
Bubinga	19,5201	-0,035686	-0,9311	86,70	0,0000
Caoba	10,7393	-0,0137409	-0,6496	42,20	0,0001
Cerejeira	12,4589	0,0199007	-0,9440	89,12	0,0000
Chopo	3,95894	-0,00605723	-0,9072	82,31	0,0000
Etimoe	9,60893	-0,0153998	-0,9050	81,89	0,0000
Jatoba	28,6148	-0,0712613	-0,8607	74,08	0,0000
Plátano	9,78365	-0,0172585	-0,9063	82,15	0,0000
Talí	22,1515	-0,0595015	-0,9513	90,51	0,0000
Tilo	5,80174	-0,0113561	-0,9256	85,68	0,0000

(1) y (2) Intercepto y pendiente de la función $y=a+bz$.

(3) Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

La representación gráfica de los modelos linealizados transformados se muestran en la figura 5.7.

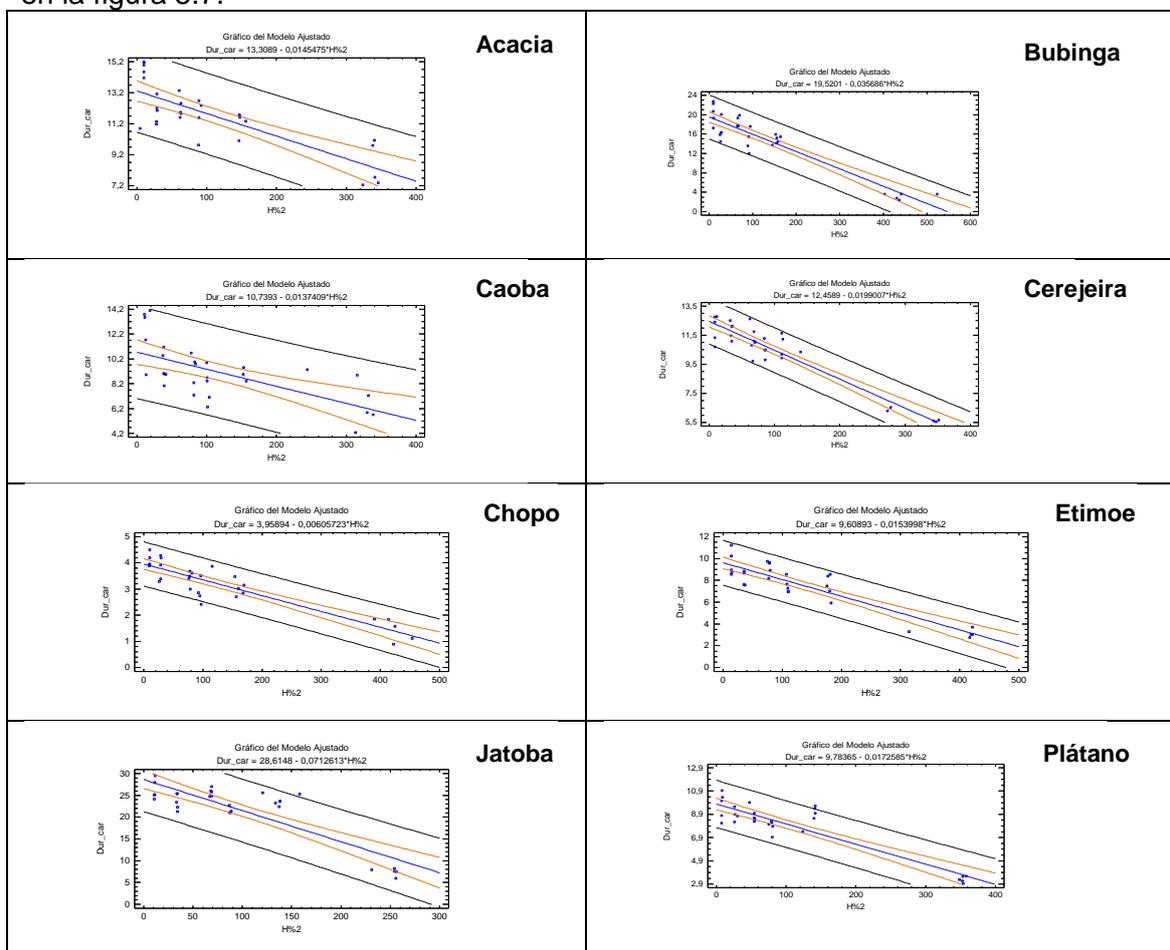


Figura 5.7. Comportamiento de la dureza (carrera constante) para las especies en función de la humedad para el modelo lineal.

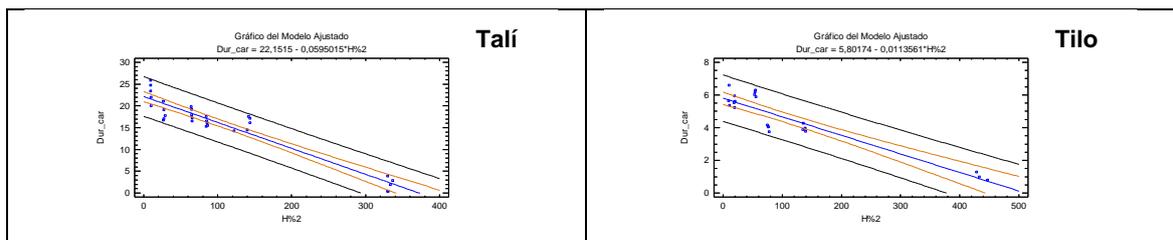


Figura 5.7 (continuación). Comportamiento de la dureza (carrera constante) para las especies en función de la humedad para el modelo lineal.

- **Comparación de líneas de regresión linealizadas para la variación de dureza a carrera constante con la humedad.**

Para poder observar que comportamiento presentaba la dureza de las especies para el ensayo a carrera constante entre sí y así poder establecer una comparativa, se realizó una comparación de las líneas de regresión linealizadas.

Del análisis ANOVA que se obtiene de las líneas de regresión se concluye que no existen diferencias significativas entre todas ellas (tanto para la pendiente como para el valor del punto de corte).

Tabla 5.19. Valores ANOVA para las funciones linealizadas de dureza (carrera constante).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
H%2	2709,91	1	2709,91	911,39	0,0000
Interceptos	7493,63	9	832,626	280,03	0,0000
Pendientes	1330,96	9	147,884	49,74	0,0000
Modelo	11534,5	19			

Este resultado queda visible gráficamente en la Figura 5.8, donde se puede observar como la mayor parte de las especies, toma un comportamiento similar, es decir, presentan la misma respuesta ante la humedad para el ensayo a carrera constante. Cabe destacar, que Bubinga, Jatoba y Talí, presentan comportamientos diferentes al resto de especies, destacando que además son las especies con una mayor densidad anhidra.

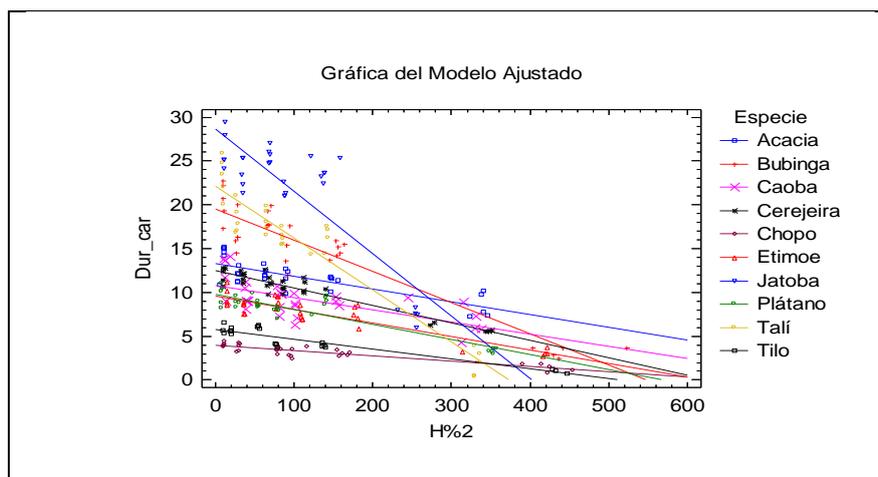


Figura 5.8. Gráfico de comparación del comportamiento que presenta la dureza de las especies en relación a la humedad para el ensayo a carrera constante.

5.3.3. Comparación de la variación de la dureza a fuerza constante con la humedad entre especies.

En este análisis, se vuelve a repetir nuevamente el proceso de transformación de la función cuadrado de x en un modelo lineal.

- **Determinación de los modelos lineales de las funciones cuadrado de X transformadas.**

En la Tabla 5.19, los valores de coeficiente de correlación múltiple, se muestran significativamente válidos para la linealización de acuerdos con el p-valor. A pesar de ello algunas especies como Etimoe, Plátano y Tilo muestran un coeficiente de correlación mucho mayor.

De acuerdo con la correlación, todas las especies muestran un decrecimiento de la linealidad hacia la derecha, lo que significa que a mayor humedad menor dureza.

Tabla 5.20. Valores de la función lineal para cada especie.

Especies	Datos				
	a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ⁽⁴⁾	p-valor ANOVA
Acacia	7,93708	-0,00190617	-0,4998	24,98	0,0049
Bubinga	7,67446	-0,0015034	-0,5694	32,42	0,0010
Caoba	7,33658	-0,0029801	-0,6066	36,08	0,0004
Cerejeira	7,23132	-0,00216926	-0,6788	46,08	0,0000
Chopo	5,08204	-0,00396103	-0,7961	63,38	0,0000
Etimoe	6,90804	-0,00254463	-0,9062	82,13	0,0000
Jatoba	8,09844	-0,0012872	-0,4139	17,13	0,0230
Plátano	7,05832	-0,00306425	-0,9350	87,42	0,0000
Talí	7,84107	-0,0023973	-0,5819	33,87	0,0007
Tilo	6,36806	-0,00707371	-0,9750	95,06	0,0000

⁽¹⁾ y ⁽²⁾ Intercepto y pendiente de la función $y=a+bx^2$.

⁽³⁾ Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

En la Figura 5.9 queda representada gráficamente la linealización de las funciones cuadrado de x a las que se ajustaba cada especie para la dureza a fuerza constante en función de la humedad.

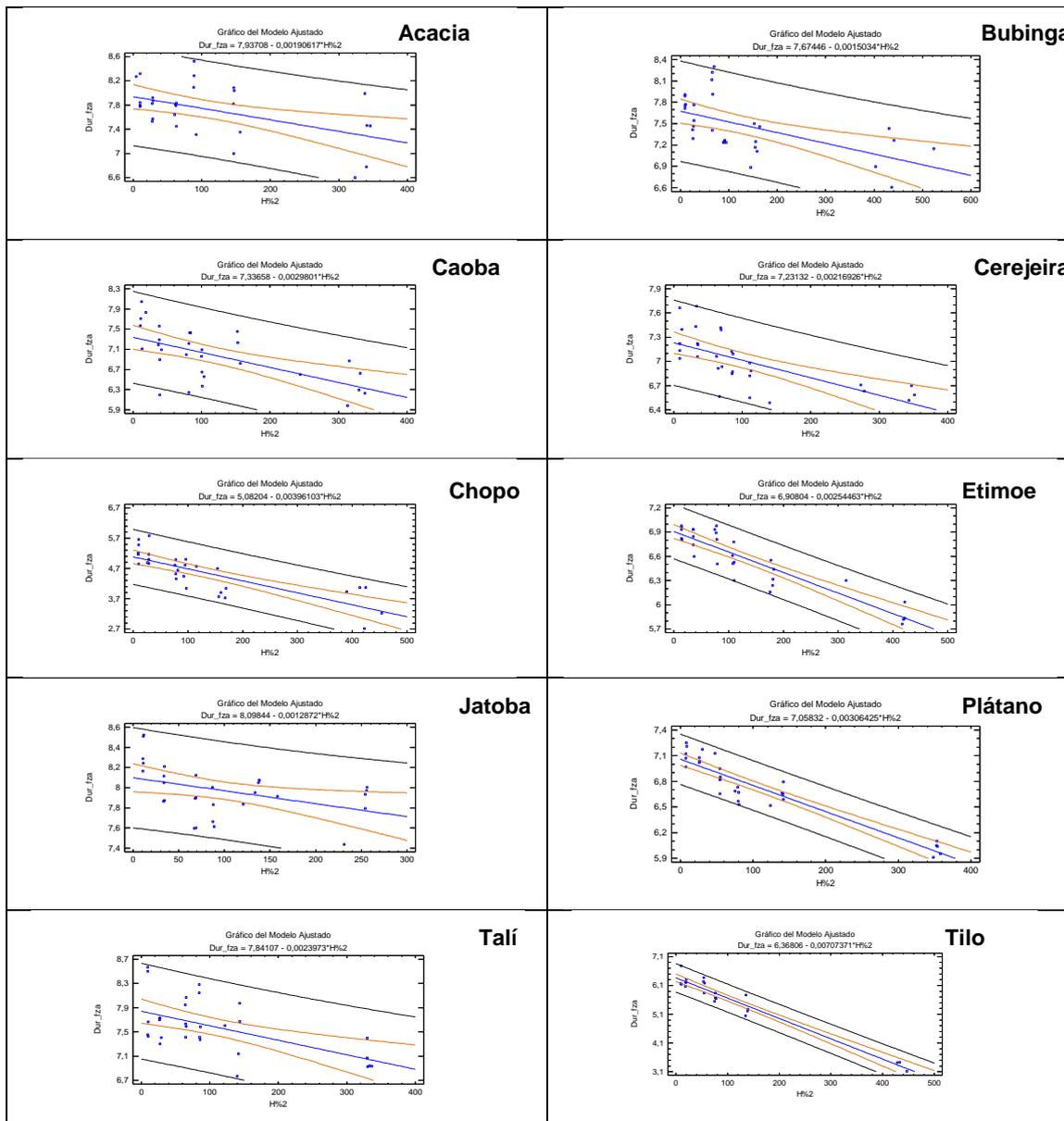


Figura 5.9. Comportamiento de la dureza (carrera constante) para las especies en función de la humedad para el modelo lineal.

- **Comparación de líneas de regresión linealizadas para la variación de dureza a fuerza constante con la humedad.**

En la Tabla 5.21, es posible observar como los p-valores para interceptos y pendiente determinan que no existen diferencias significativas.

Tabla 5.21. Valores ANOVA para las funciones linealizadas de dureza (fuerza constante).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
H%2	46,4092	1	46,4092	467,24	0,0000
Interceptos	275,955	9	30,6617	308,69	0,0000
Pendientes	10,121	9	1,12455	11,32	0,0000
Modelo	332,485	19			

Tal y como muestran los valores de la Tabla 5.21, al observar la Figura 5.10, se puede comprobar como todas las especies, excepto el tilo, el cual difiere ligeramente su pendiente del resto, siguen un mismo patrón del comportamiento de la dureza frente a la humedad cuando sometidas al ensayo de fuerza constante.

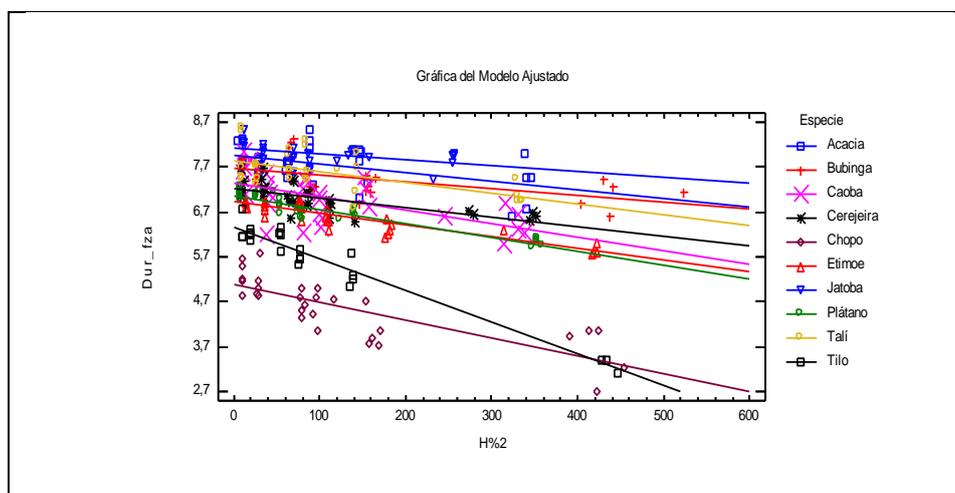


Figura 5.10. Comparación del comportamiento que presenta la dureza de las especies en relación a la humedad para el ensayo a fuerza constante.

5.3.4. Variación de la dureza con la densidad anhidra.

En este apartado del análisis, nuevamente se vuelve a plantear una serie de regresiones para determinar que comportamiento sigue la dureza de las especies en relación a la densidad anhidra.

- **Variación de la dureza para el ensayo de carrera constante con la densidad anhidra.**

Los resultados de la Tabla 5.21, muestra un comportamiento bastante aceptable de la dureza a carrera constante en función de la densidad anhidra, con un coeficiente de correlación múltiple significativamente válido, pero algo inferior si comparamos dicho coeficiente con el de la Tabla 5.22, donde la ausencia de las piezas de la caja 6 generan menos *outlayer* y por tanto un mejor coeficiente de correlación.

Tabla 5.21. Valores de la función lineal para el conjunto de las especies.

Datos				
a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ^{%(4)}	p-valor ANOVA
-5,92553	25,8619	0,7720	59,60	0,0000

(1) y (2) Intercepto y pendiente de la función $y=a+bx$.

(3) Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

En la Figura 5.11, es posible observar una linealidad de la dureza a carrera constante en relación a la densidad anhidra, y que a medida que aumenta esta última, se va perdiendo debido a una mayor variabilidad de la dureza para densidades altas, como consecuencia de la presencia de los datos de la caja 6.

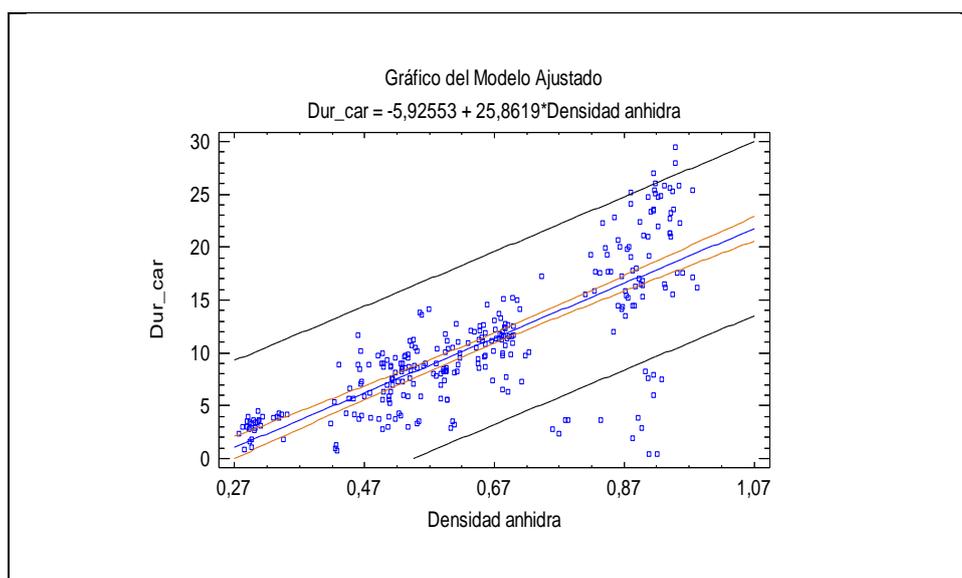


Figura 5.11. Comportamiento de la dureza a carrera constante en función de la densidad anhidra.

Observando los valores del coeficiente de correlación múltiple de la Tabla 5.22 se puede comprobar que el comportamiento que muestra la dureza del as especies a carrera constante en función de la densidad anhidra se ajusta bastante bien a un modelo lineal con un elevado nivel de significancia. La correlación toma un valor próximo a uno y con signo positivo, lo que indica que la dureza aumenta con la densidad de manera general para el conjunto de las especies.

Tabla 5.22. Valores de la función lineal para el conjunto de las especies exceptuando caja 6.

Datos				
a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ^{%(4)}	p-valor ANOVA
-7,24342	29,6397	0,9093	82,69	0,0000

(1) y (2) Intercepto y pendiente de la función $y=a+bx$.

(3) Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

En la Figura 5.12, se muestra gráficamente el patrón de comportamiento que sigue la dureza a carrera constante en función de la densidad anhidra para el conjunto

de especies, exceptuando la caja 6, produciéndose un aumento de la dureza con el aumento de la densidad anhidra, y también un incremento en la variabilidad de la misma para densidades anhidras mayores.

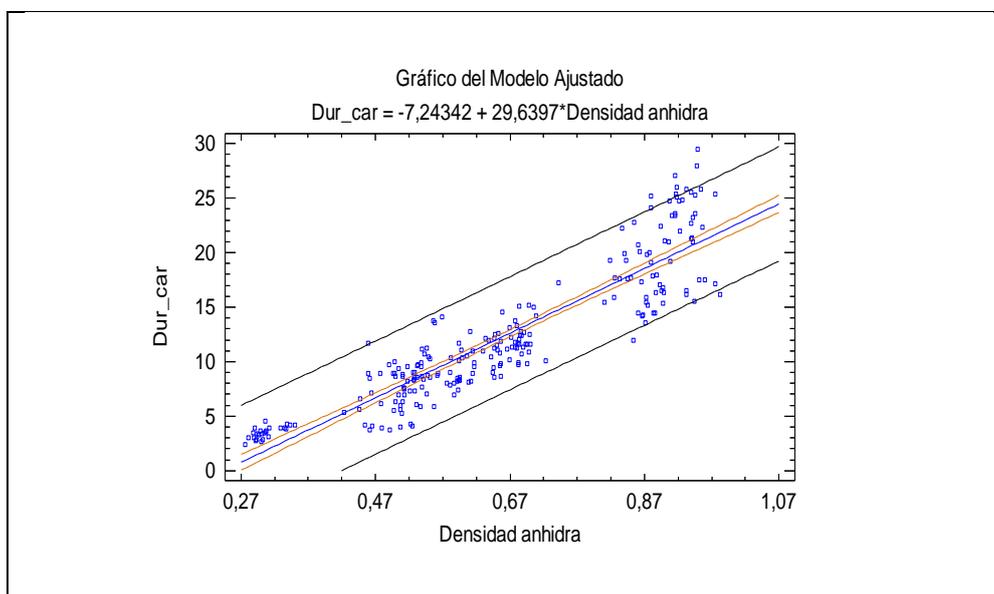


Figura 5.12. Comportamiento de la dureza a carrera constante en función de la densidad anhidra.

▪ **Variación de la dureza a ensayo de fuerza constante con la densidad anhidra.**

Los valores de la Tabla 5.23, muestran como la dureza para el ensayo de fuerza constante se ajustan, en función de la densidad anhidra, significativamente, al modelo de **función inversa de x**, para el conjunto de los datos, con un coeficiente de correlación múltiple elevado. La correlación muestra una crecimiento de la dureza a fuerza constante para un aumento de la densidad anhidra.

Tabla 5.23. Valores de la función lineal para el conjunto de las especies exceptuando caja 6.

Datos				
a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ⁽⁴⁾ %	p-valor ANOVA
9,43888	-1,5016	-0,8580	73,61	0,0000

(1) y (2) Intercepción y pendiente de la función $y=a+b/x$.

(3) Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

En la Figura 5.13 se puede observar gráficamente un aumento de la dureza para el ensayo a fuerza constante siguiendo el patrón de comportamiento según la **función inversa de x**, a medida que se aumenta la densidad anhidra para el conjunto de especies, manteniéndose una variabilidad constante entre ambas características,

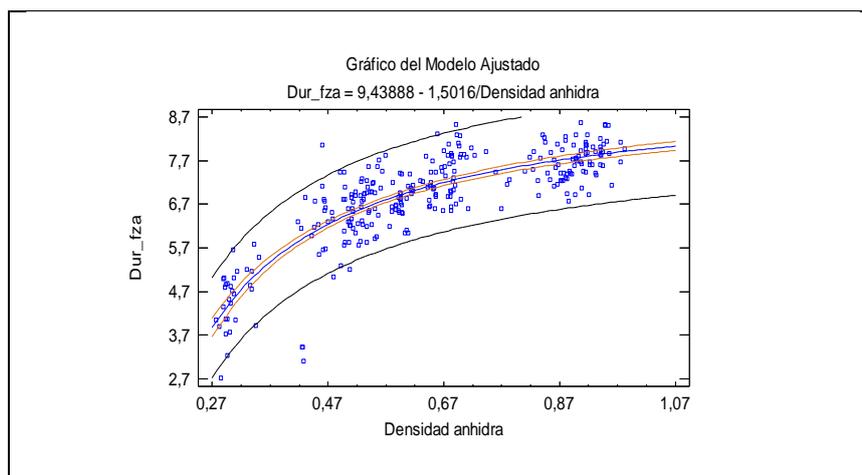


Figura 5.13. Comportamiento de la dureza a carrera constante en función de la densidad anhidra.

Los valores de la Tabla 5.24, muestran unos valores muy similares a los de la Tabla 5.23, incluso después de haber eliminado los resultados de la caja 6.

Tabla 5.24. Valores de la función inversa de X para el conjunto de especies exceptuando la caja 6.

Datos				
a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ⁽⁴⁾	p-valor ANOVA
9,39891	-1,42083	0,8858	78,46	0,0000

(1) y (2) Intercepto y pendiente de la función $y=a+b/x$.

(3) Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

En la Figura 5.14 se puede observar gráficamente la relación que presenta la dureza para el ensayo de fuerza constante en función de la densidad anhidra, tras haber eliminado los datos de la caja 6, mantienen un comportamiento similar al descrito para la Figura 5.13.

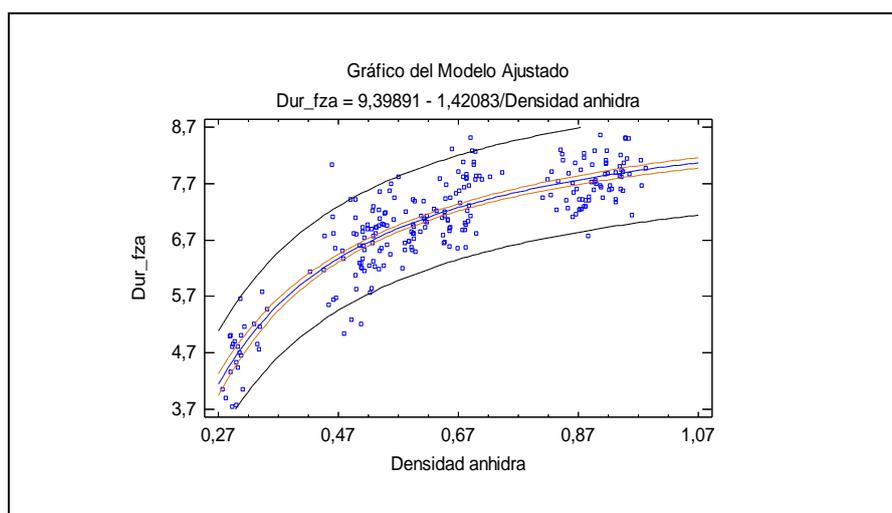


Figura 5.14. Comportamiento de la dureza a fuerza constante en función de la densidad anhidra.

5.3.5. Comparación de la variación de la dureza según la densidad anhidra por especie.

Para llevar a cabo este apartado se procedió a comparar las líneas de regresión para las que se ajusta el comportamiento de la dureza de cada especie en función de la densidad anhidra.

- **Comparación entre la dureza según los ensayos a carrera constante para los valores de densidad anhidra.**

En la Tabla 5.25, se muestra que las pendientes de las líneas de regresión para cada especie no muestra una relación estadísticamente significativa.

Tabla 5.25. Valores ANOVA para las funciones lineales de dureza (carrera constante).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Densidad anhidra	7357,17	1	7357,17	495,45	0,0000
Interceptos	829,015	9	92,1128	6,20	0,0000
Pendientes	118,031	9	13,1145	0,88	0,5407
Modelo	8304,21	19			

En la Figura 5.15, se muestra gráficamente como la mayoría de las especies siguen un patrón similar en el comportamiento de su dureza para el ensayo a carrera constante en relación a la densidad anhidra. Por el contrario, otras especies como Caoba, Bubinga y Jatoba se desvían de estos patrones de comportamiento, pero siempre cumpliéndose un aumento de la dureza al aumentar la densidad anhidra.

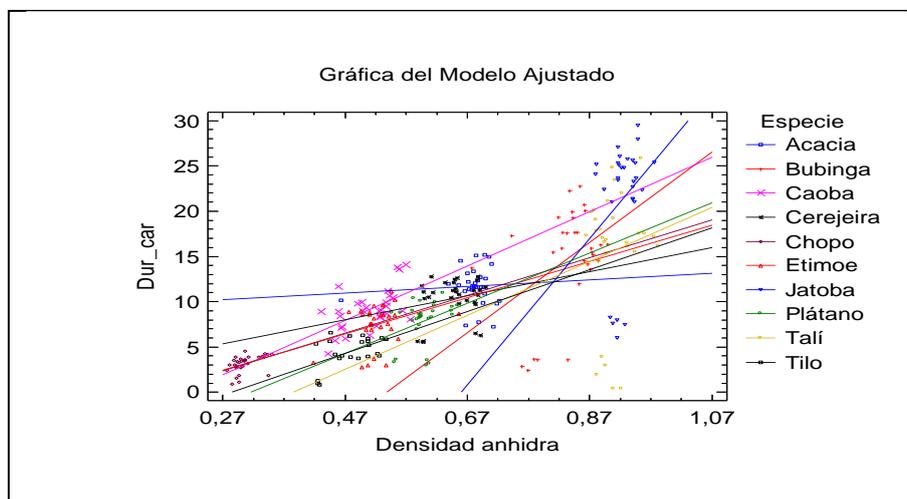


Figura 5.15. Comparación del comportamiento que presenta la dureza de las especies en relación a la densidad anhidra para el ensayo a carrera constante.

- **Comparación entre la dureza según los ensayos a fuerza constante para los valores de densidad anhidra por especie.**

El paso previo para poder llevar a cabo esta comparación y mostrar su representación gráfica, es tomar como patrón de comportamiento para la dureza las

funciones linealizadas, de tal forma que el término de *1/densidad anhidra* fue transformado al modelo lineal.

En la Tabla 5.26, se pone de manifiesto mediante el resultado del p-valor, que no existe una relación estadísticamente significativa entre las pendientes de dichas líneas de regresión de cada especie.

Tabla 5.26. Valores ANOVA para las funciones linealizadas de dureza (fuerza constante).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
1/Densidad anhidra	264,638	1	264,638	1193,53	0,0000
Interceptos	31,804	9	3,53377	15,94	0,0000
Pendientes	2,75074	9	0,305638	1,38	0,1976
Modelo	299,192	19			

En la Figura 5.16, queda representada gráficamente una comparación de las durezas para el ensayo a fuerza constante de cada una de las especies en función a la densidad anhidra. Vemos como dicho comportamiento responde a los patrones de una función inversa de x , de ahí que se produzca un decrecimiento hacia la derecha de la dureza. También es posible observar como la Cerejeira, Talí y Tilo muestran un comportamiento diferentes respecto al resto de especies y entre sí para este método de ensayo.

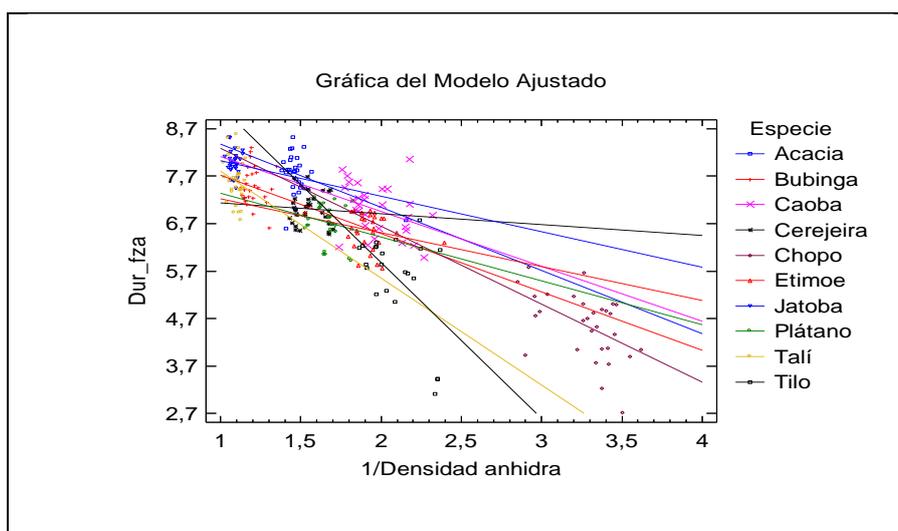


Figura 5.16. Comparación del comportamiento que presenta la dureza de las especies en relación a la densidad anhidra para el ensayo a fuerza constante.

5.3.6. Relación general entre las dos durezas.

Para llevar a cabo una comparación de los valores de dureza que se presentaban de cada uno de los métodos ensayados en el presente trabajo –carrera constante y fuerza constante–, se realizó una regresión simple entre ambas. De acuerdo con dicha formulación empírica de relación, se ha transformado el valor de la dureza, procedente de su relación con la humedad.

En la Tabla 5.27 se puede observar como la relación entre ambas, para el conjunto de los datos y exceptuando la caja 6, se ajustaba a los patrones de una función exponencial, tal y como demuestra el valor del coeficiente de correlación múltiple. Además, la correlación presenta un valor alto y positivo, lo que indica un crecimiento en dicha relación.

Tabla 5.27. Valores de la función exponencial para la relación entre ambas durezas.

Datos				
a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ⁽⁴⁾	p-valor ANOVA
-1,2915	0,520795	0,9134	83,42	0,0000

⁽¹⁾ y ⁽²⁾ Intercepto y pendiente de la función $y = \exp(a + b \cdot x)$.

⁽³⁾ Correlación.

⁽⁴⁾ Coeficiente de determinación.

La representación gráfica que se muestra en la Figura 5.17, se puede observar que la variabilidad en durezas altas (correspondiéndose con densidades altas) es mucho mayor que en durezas medias o pequeñas a pesar de presentar un valor global de R² ajustado muy bueno. Como consecuencia de esto, se puede predecir una dureza mejor para una especie con baja densidad, como es el caso del chopo, que para otras especies con mayor densidad como la Bubinga.

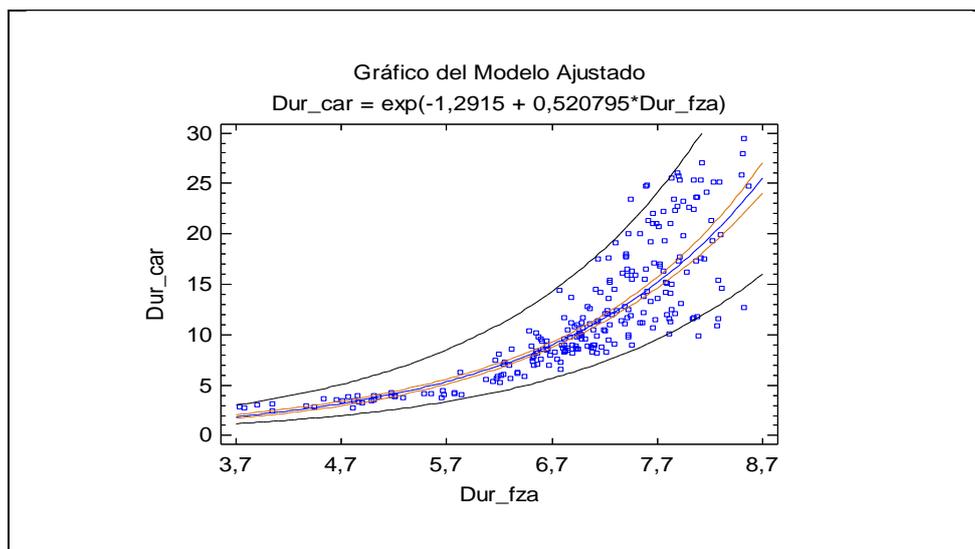


Figura 5.17. Relación entre las dos durezas.

5.3.7. Relación de la dureza a humedad normal (12%).

Tras una homogeneización de la dureza al 12%, en los valores de la Tabla 5.28 se puede observar como la relación existente entre ambas durezas –a carrera constante y a fuerza constante- es bastante buena, con un elevado coeficiente de correlación múltiple y un valor correlación que determina que existe una relación exponencial y creciente entre ambas durezas.

Tabla 5.28. Valores de la función exponencial para la relación de ambas durezas.

Datos				
a ⁽¹⁾	b ⁽²⁾	COR ⁽³⁾	R ² ajust ^{%(4)}	p-valor ANOVA
-0,900819	0,472511	0,921951	84,6802	0,0000

(1) y (2) Intercepto y pendiente de la función $y = \exp(a + b \cdot x)$.

(3) Correlación.

(4) Coeficiente de determinación.

En la Figura 5.18 es posible observar como muestra un comportamiento muy similar que para el conjunto de humedades, adoptando un valor de coeficiente de determinación muy bueno. Existe una buena correlación entre maderas blandas y durezas bajas.

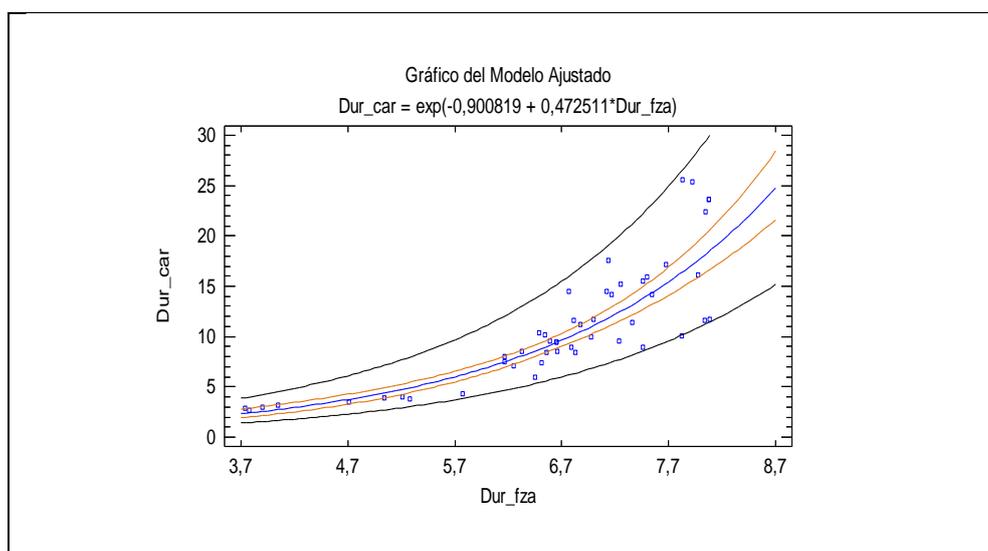


Figura 5.18. Relación entre las dos durezas.

5.3.8. Relación de la dureza con la densidad anhidra y la humedad.

A través de un análisis de regresión múltiple, se pretende mostrar la relación existente entre la dureza ofrecida por cada uno de los dos ensayos en función de las variables (densidad anhidra y humedad) en su conjunto. En ambos casos se operó sin la caja 6.

- **Relación de la dureza según el ensayo a carrera constante con la densidad anhidra y la humedad.**

La ecuación del modelo ajustado de regresión lineal múltiple que describe la relación entre la dureza a carrera constante para las variables independientes (densidad anhidra y humedad) es:

$$Dur_{car} = -6,72926 + 30,2666 \cdot \text{Densidad anhidra} - 0,0161609 \cdot H\%2$$

El ANOVA del modelo presenta un p-valor $< 0,05$ (**0,0000**), lo que indica que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables. Así mismo, el análisis muestra un R^2 ajustado muy bueno (**83,9579%**).

Las variables independientes, resultan estadísticamente significativas para el modelo, con un p-valor en ambos casos $<0,05$ (**0,0000**)

- **Relación de la dureza según el ensayo a fuerza constante con la densidad anhidra y la humedad.**

Nuevamente, para el caso de la dureza a fuerza constante, la ecuación del modelo ajustado de regresión lineal múltiple que describe la relación con las variables independientes (densidad anhidra y humedad) es:

$$\text{Dur_fza} = 9,72334 - 1,47198 \cdot 1/\text{Densidad anhidra} - 0,00484369 \cdot \text{H}\%2$$

El ANOVA del modelo presenta un p-valor $< 0,05$ (**0,0000**), lo que indica que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables. Así mismo, el análisis muestra un R^2 ajustado muy bueno (**69,8907%**).

En cuanto a las variables independientes, ambas son estadísticamente significativas para el modelo, con un p-valor en ambos casos $<0,05$ (**0,0000**).

6. CONCLUSIONES.

6. CONCLUSIONES.

- Para el ensayo de dureza a carrera constante, el plátano presenta durezas medias similares a Etimoe y Caoba. Para el ensayo a fuerza constante, la Caoba y la Cerejeira y Talí, Bubinga acacia muestran valores de dureza medios similares.
- Los ensayos de dureza a carrera constante, determinan un comportamiento similar para todas las especies excepto para Jatoba, Talí y Bubinga.
- Los ensayos de dureza a fuerza constante determinan un comportamiento similar frente al contenido de humedad en la mayoría de las especies excepto en el caso del Tilo.
- A medida que aumenta la densidad anhidra de las especies, aumenta la dureza de las mismas. Para el caso de los ensayos a carrera constante lo hace de forma lineal y según el método a fuerza constante lo hace inversamente a la densidad anhidra.
- El método a carrera constante es menos seguro para ensayos de dureza, debido al elevado coeficiente de variación que presenta; existiendo una mayor precisión para medida de durezas cuando la densidad de las especies es menor, esto podría deberse a que la precisión de la célula de carga de la máquina disminuye con especies de densidad alta (fuerzas más elevadas).
- La relación existente entre los métodos de dureza según los ensayos de carrera constante y fuerza constante, se asimilan a una función exponencial tanto para el conjunto de las humedades como para una humedad homogeneizada al 12%, obteniéndose coeficientes de correlación muy elevados ($>0,90$).
- Tanto para los ensayos de dureza a carrera constante como a fuerza constante, la relación de dicha dureza en cada caso con la densidad anhidra y la humedad se ajusta a un modelo de manera significativa. Es posible afirmar que ambas variables muestran una influencia estadísticamente significativa en la dureza, con unos valores de coeficiente de determinación muy buenos.

7. BIBLIOGRAFÍA.

Alumno: José María Roldán Rico
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación: Máster en Ingeniería de Montes

7. BIBLIOGRAFÍA.

Literatura.

- Calleja Sánchez – Taiz, R. (2013). **Estudio de la efectividad de las normas de clasificación visual con madera estructural de *Populus x euramericana***. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Campus de Palencia.
- Casado Sanz, M. y Acuña Rello, L. (2000). **La madera en la construcción**. Universidad de Valladolid, E.T.S. Ingenierías Agrarias de Palencia, Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario Itagra C.T., Palencia.
- Cigalat Figuerola, E. y Soler Burillo, M. (2003). **Guía de las principales maderas y de su secado**. Ed. mundi-Prensa.
- De la Cruz Calleja, A. C. (2005). **Dinámica de nutrientes en parcelas experimentales de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier “I-214”**. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Tesis Doctoral.
- Enríquez, A. e Iglesias-Sauce, S. (2012). **Especies invasoras: El chopo híbrido (*Populus x canadensis* Moench), una especie ignorada**. Revista Foresta nº 56.
- García Esteban, L., Guindeo Casasús, A., Peraza Oramas, C. y de Palacios de Palacios, P. (2003). **La madera y su anatomía: anomalías y defectos, estructura microscópica de coníferas y frondosas, identificación de maderas, descripción de especies y pared celular**. Coedición Fundación Conde del Valle de Salazar, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Jiménez Peris, F. J. (1999). **La madera: propiedades básicas**. Ed. GET Grupo Estudios Técnicos.
- Peraza Sánchez, F., Arriaga Martitegui, F., Guindeo Casasús, A., García Esteban, L., Kasner Camacho, C., Medina Gallego, G., de Palacios de Palacios, P. y Touza Vázquez, M. (2004). **Especies de madera para carpintería, construcción y mobiliario**. Asociación de Investigación Técnica de Industrias de la Madera y Corcho, AITIM.
- Vignote-Peña, S. y Martínez Rojas, I. (2006). **Tecnología de la madera**. 3ª ed. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Vignote-Peña, S., Jiménez-Peris, F., Morales Méndez, E. y Gómez Pérez, C. (2000). **Tecnología de la madera en la construcción arquitectónica**. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ed. Mundi-Prensa.
- Wilson, K. & White, D. J. B. (1986). **The anatomy of wood: its diversity and variability**. Stobart & Son LTD, London.

Páginas web.

- ▶ <http://www.fingerjoint.es/>
- ▶ <http://www.fpl.fs.fed.us/research/centers/woodanatomy/>

8. ANEXOS.

8. ANEXOS.

Anexo al análisis descriptivo

- Variación de la dureza (carrera constante) con la humedad para cada especie.

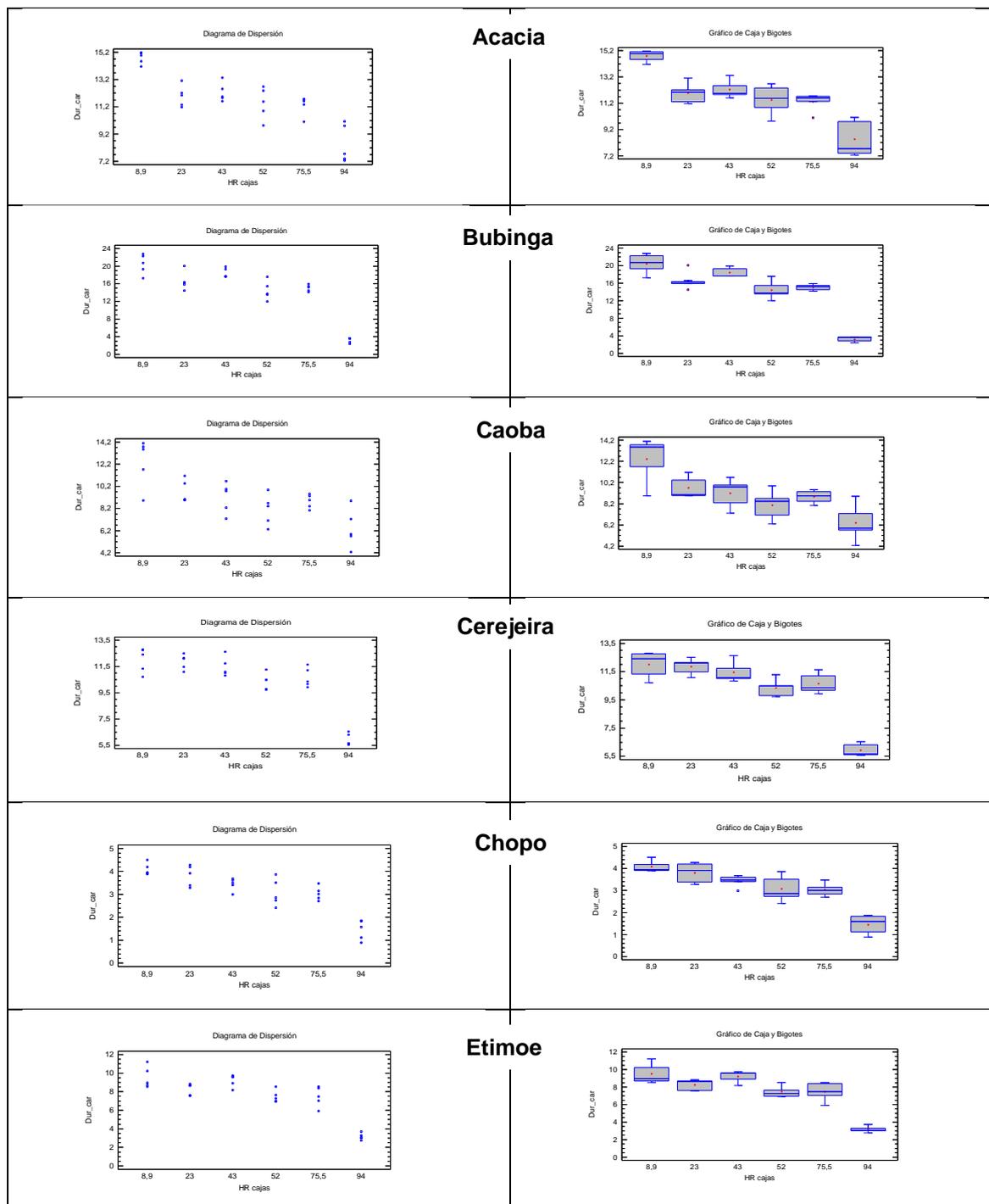


Figura a.1. Representación gráfica de la dureza a carrera constante resultante para cada una de las especies de madera.

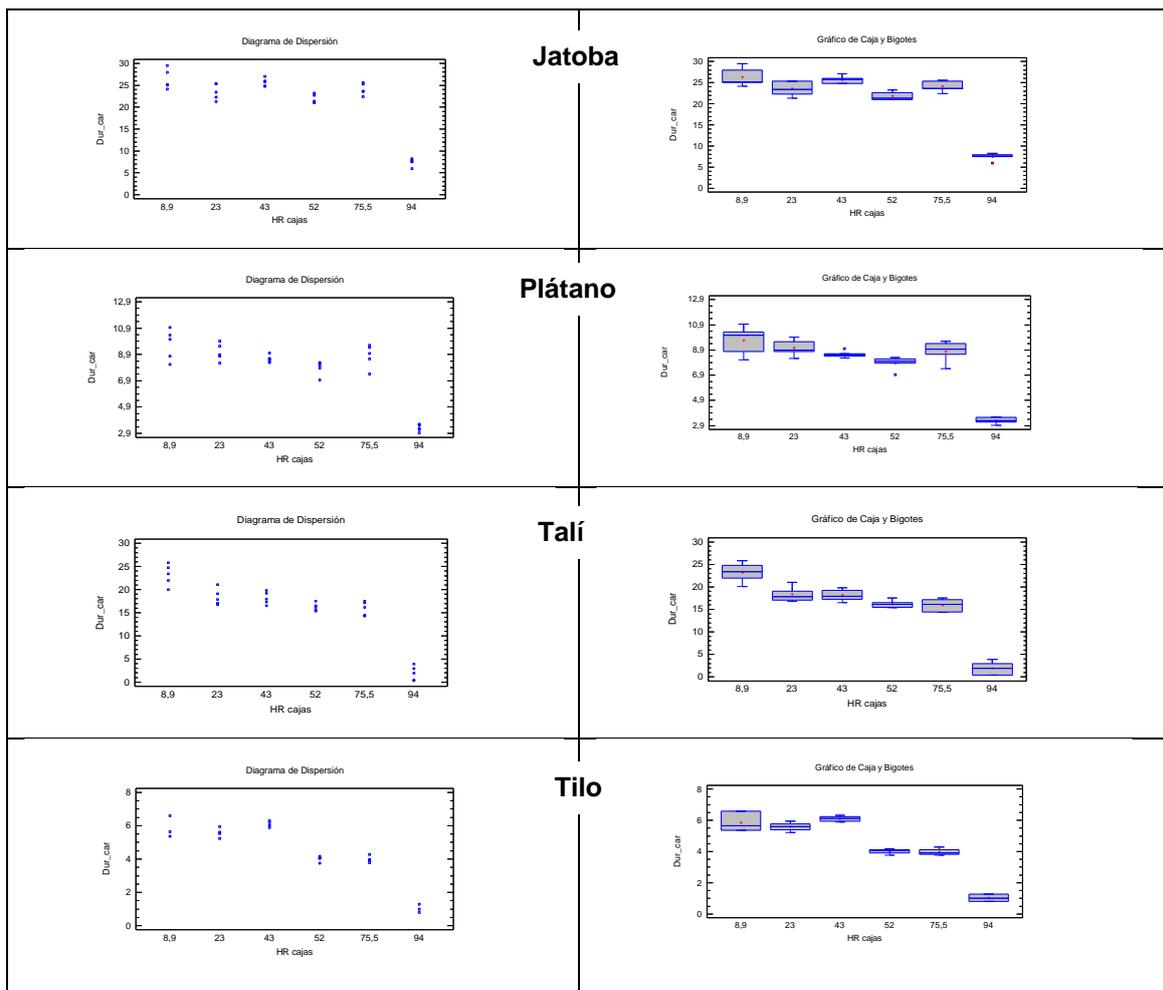


Figura a.1 (continuación). Representación gráfica de la dureza a carrera constante resultante para cada una de las especies de madera.

- **Variación de la dureza (fuerza constante) con la humedad para cada especie**

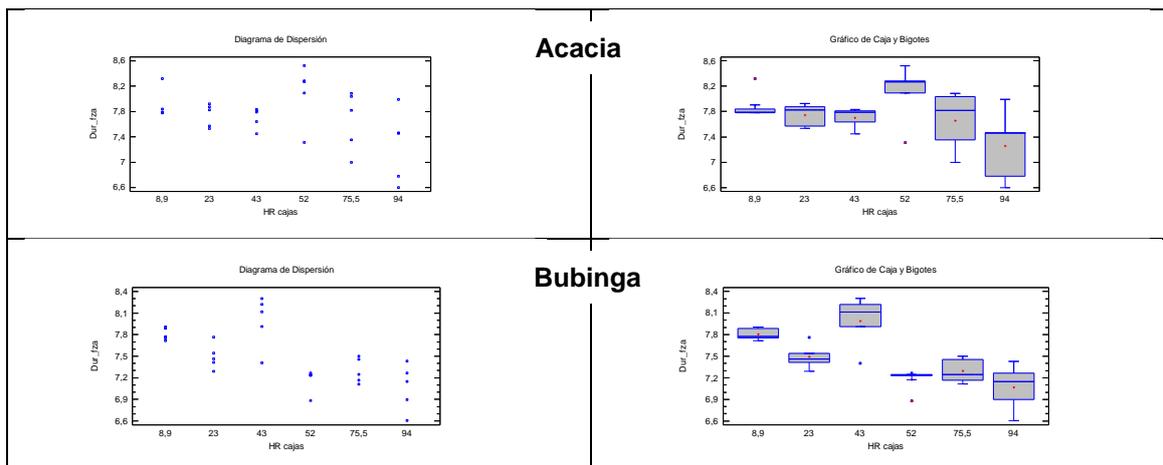


Figura a.2. Representación gráfica de la dureza a fuerza constante resultante para cada una de las especies de madera.

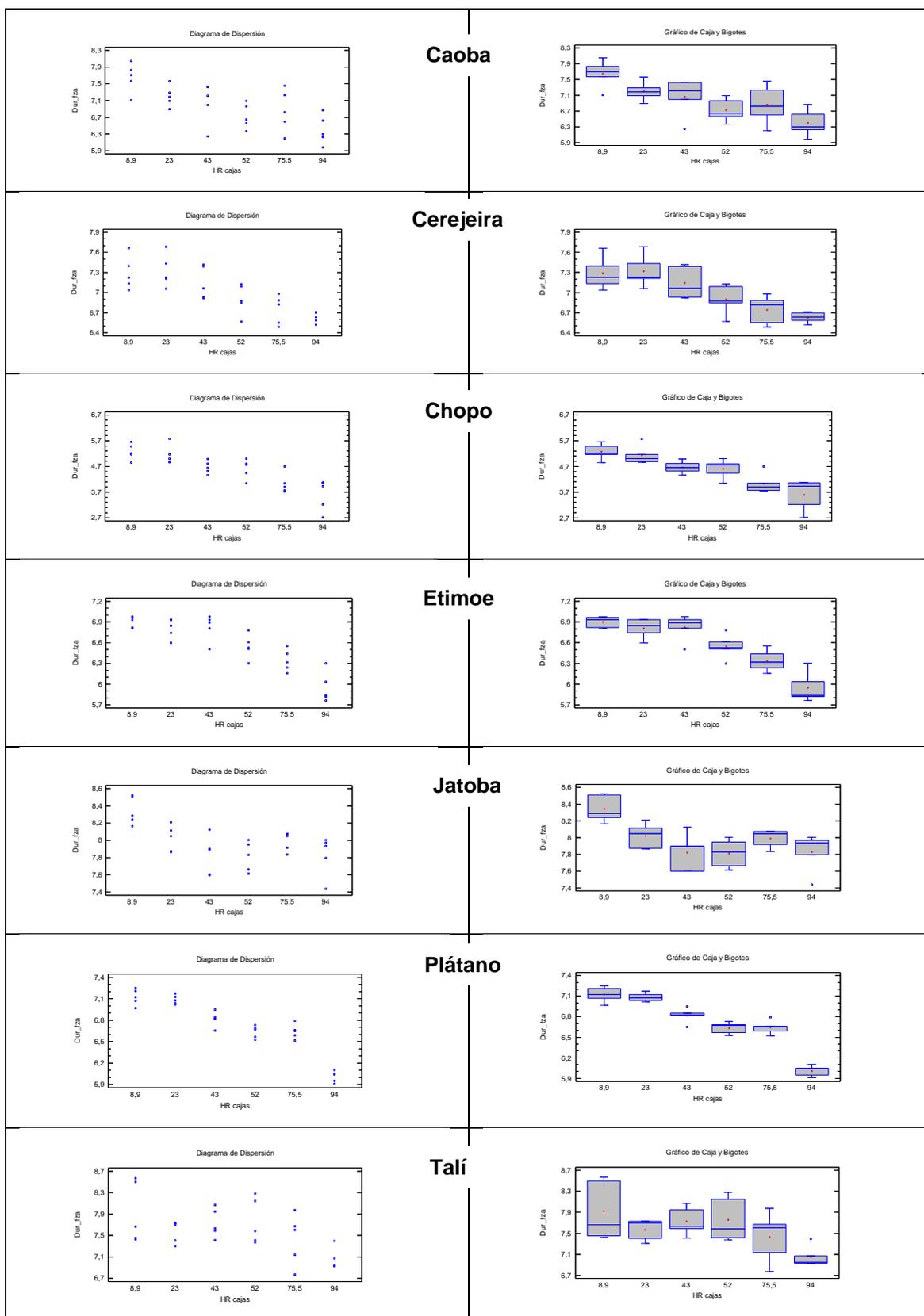


Figura a.2 (continuación). Representación gráfica de la dureza a fuerza constante resultante para cada una de las especies de madera.

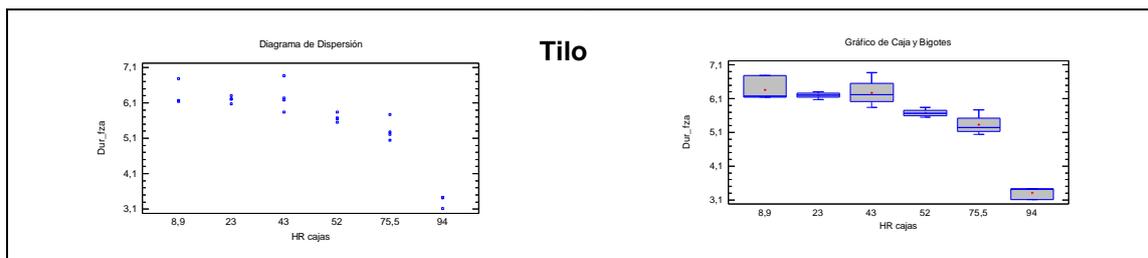


Figura a.2 (continuación). Representación gráfica de la dureza a fuerza constante resultante para cada una de las especies de madera.

Anexo al análisis predictivo

- Comparación de la dureza entre especies, a carrera constante, en función de la humedad.

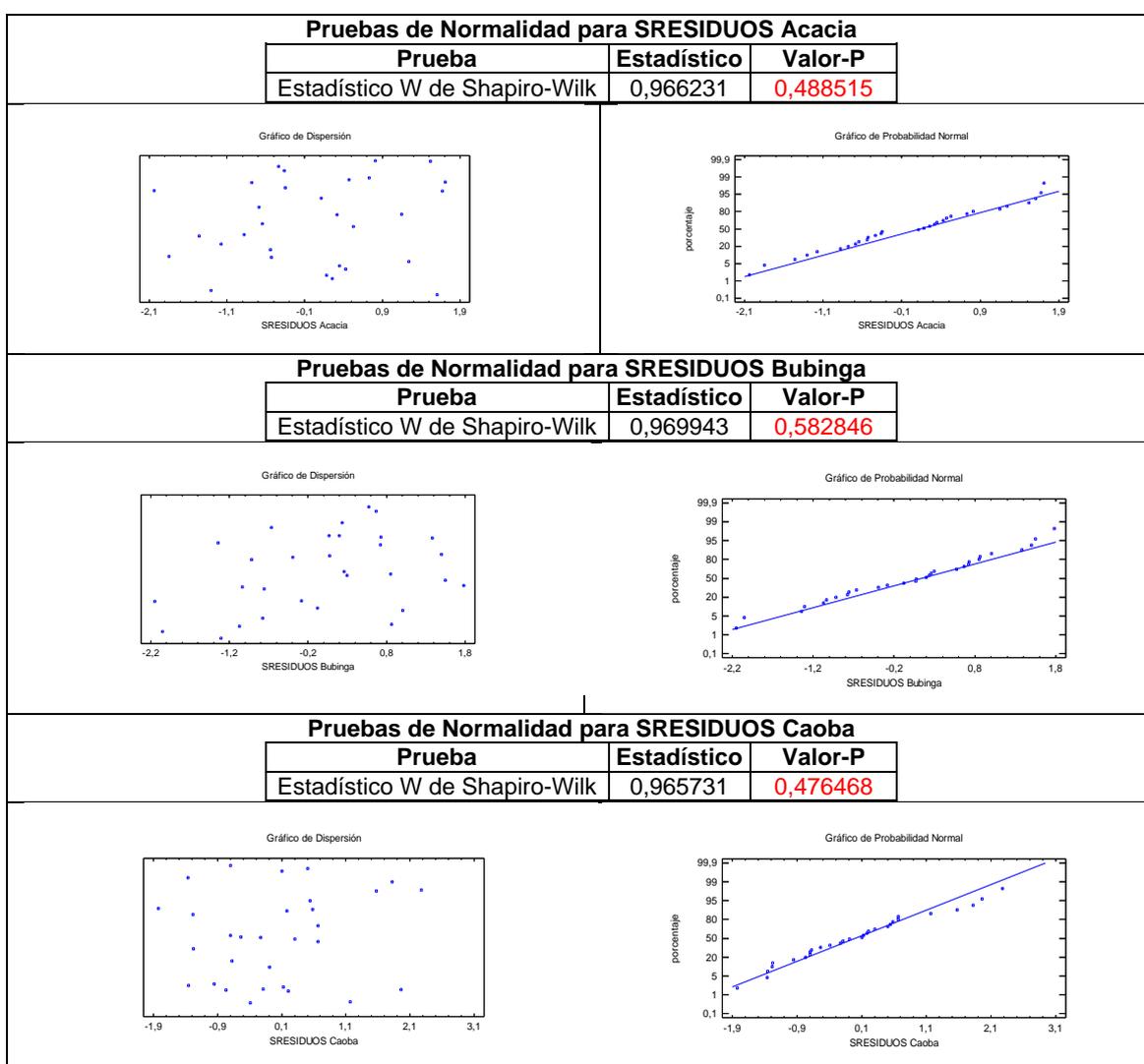


Figura a.3. Residuos para las funciones linealizadas de la dureza a carrera constante en función de la humedad de cada especie.

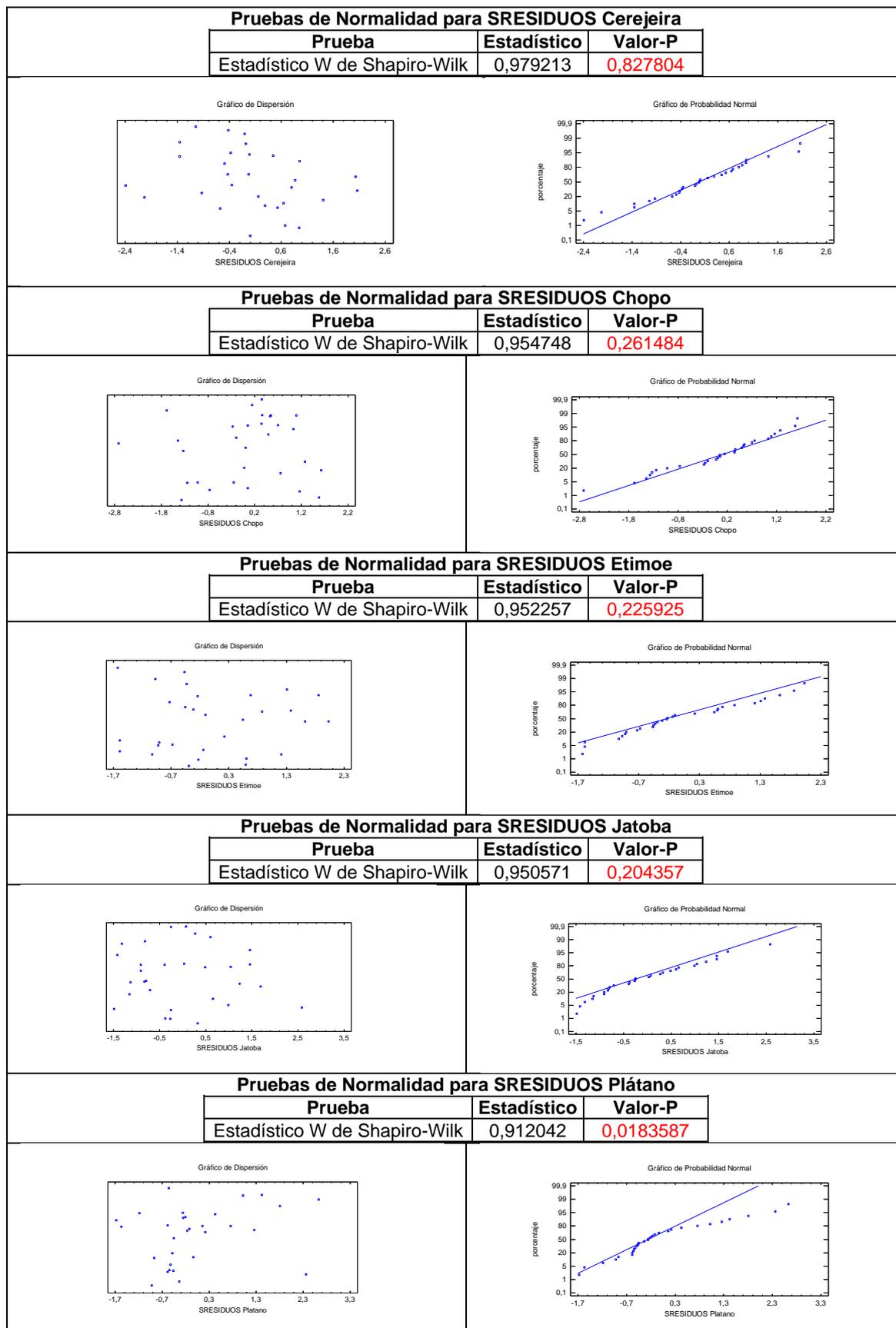


Figura a.3 (continuación). Residuos para las funciones linealizadas de la dureza a carrera constante en función de la humedad de cada especie.

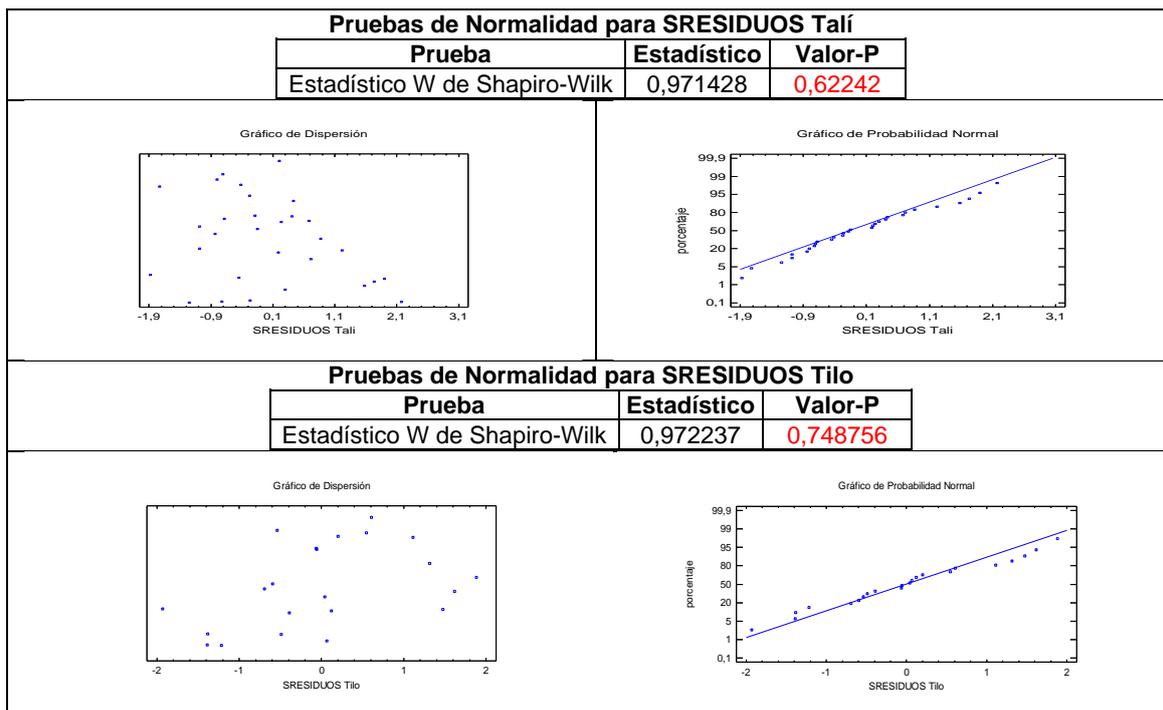


Figura a.3 (continuación). Residuos para las funciones linealizadas de la dureza a carrera constante en función de la humedad de cada especie.

- **Comparación de la variación de la dureza a fuerza constante con la humedad entre especies.**

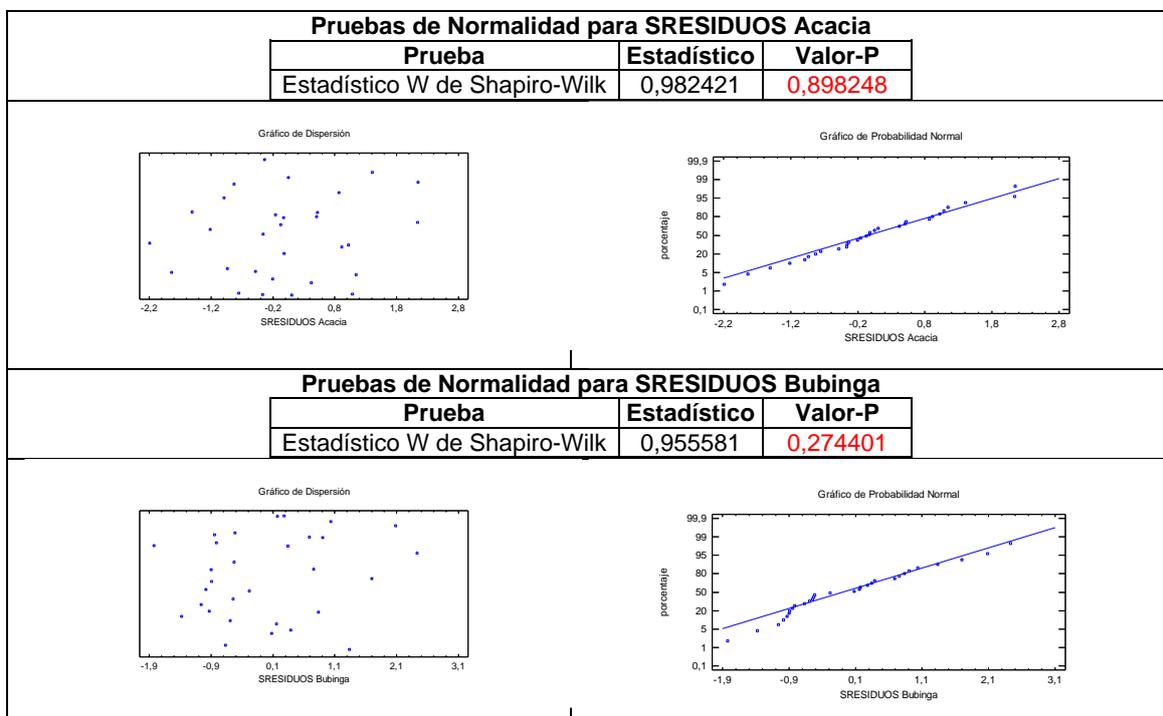


Figura a.4. Residuos para las funciones linealizadas de la dureza a fuerza constante en función de la humedad de cada especie.

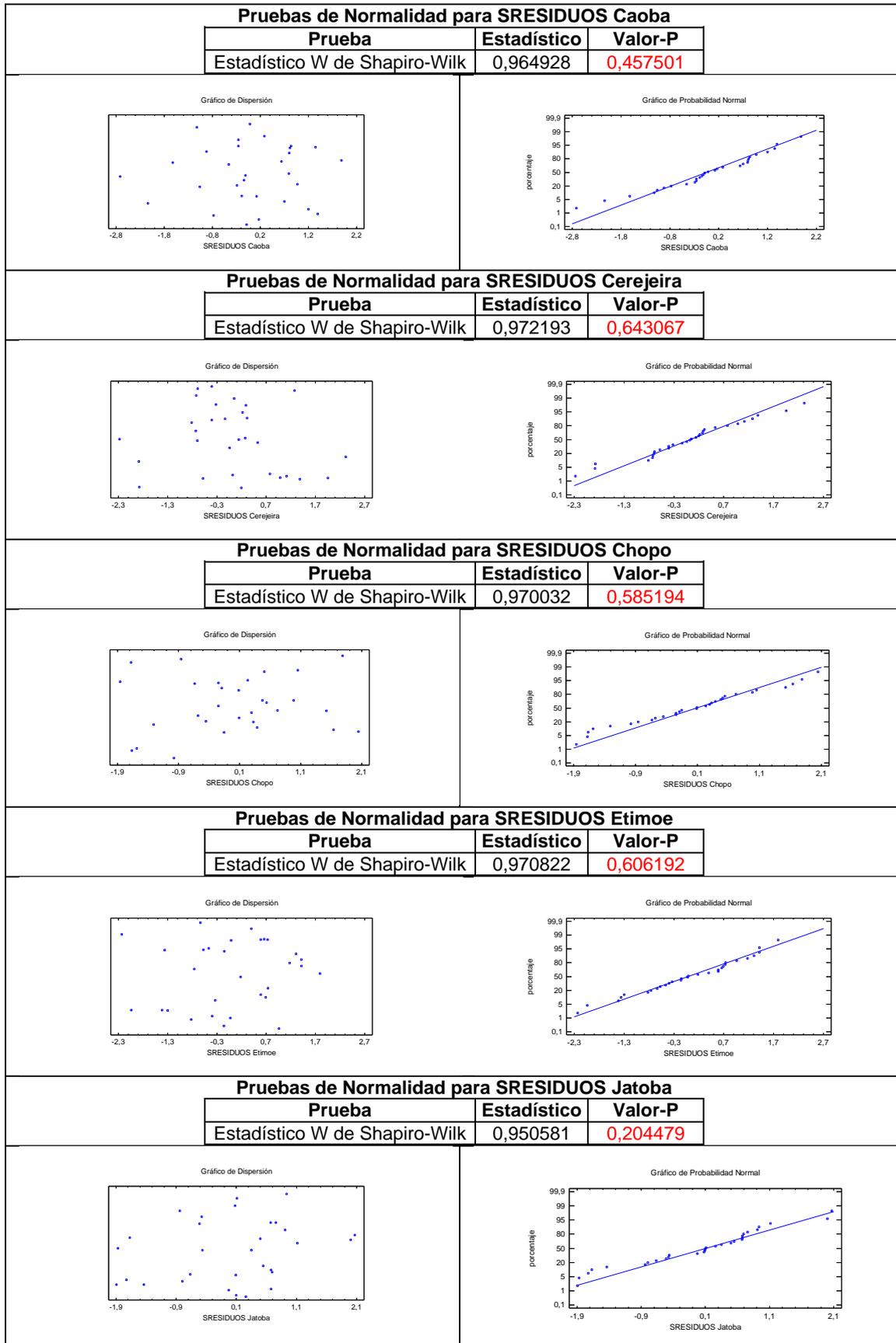


Figura a.4. Residuos para las funciones linealizadas de la dureza a fuerza constante en función de la humedad de cada especie.

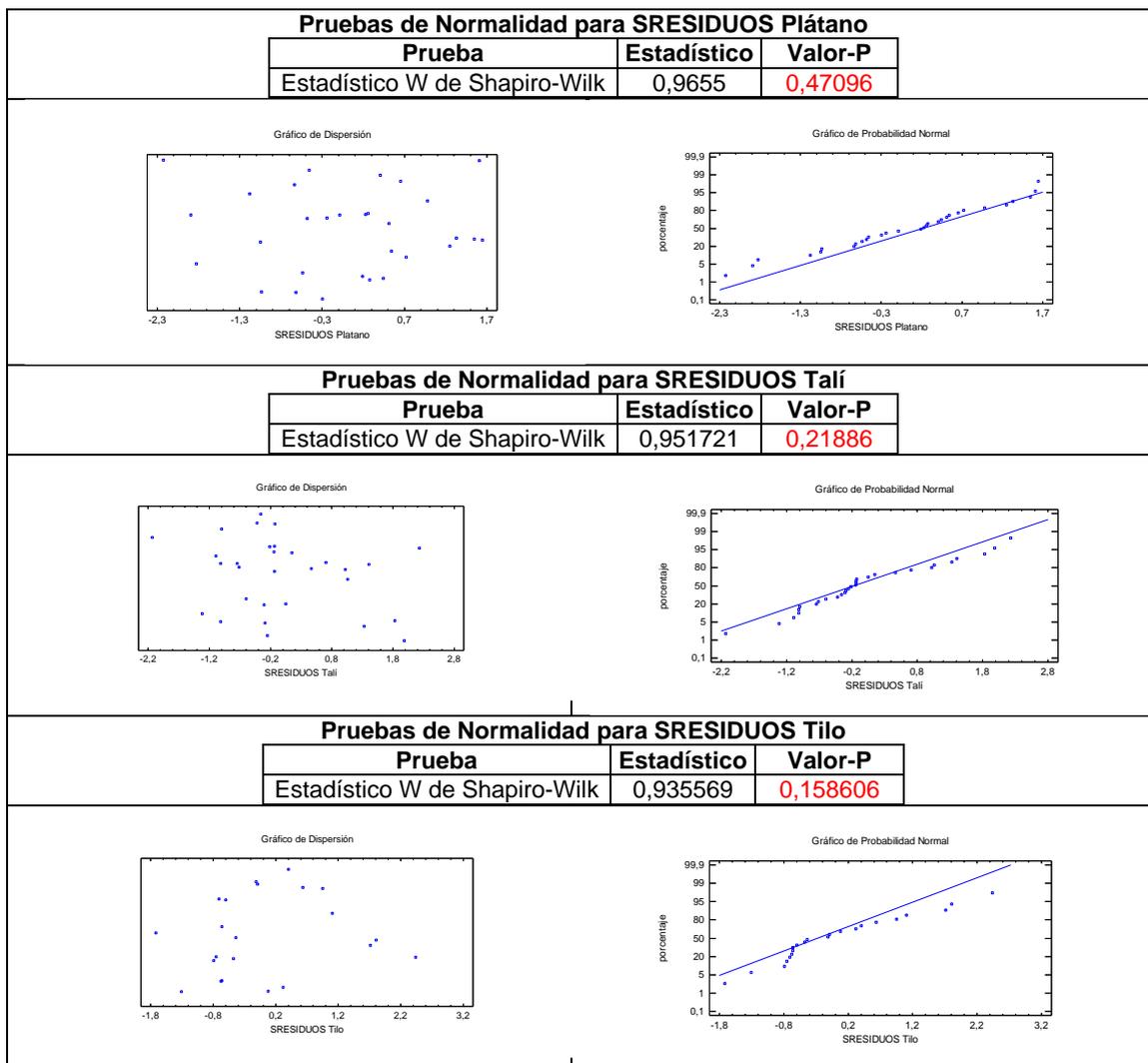


Figura a.4. (continuación). Residuos para las funciones linealizadas de la dureza a fuerza constante en función de la humedad de cada especie.

- **Variación de la dureza para el ensayo de carrera constante con la densidad anhidra.**

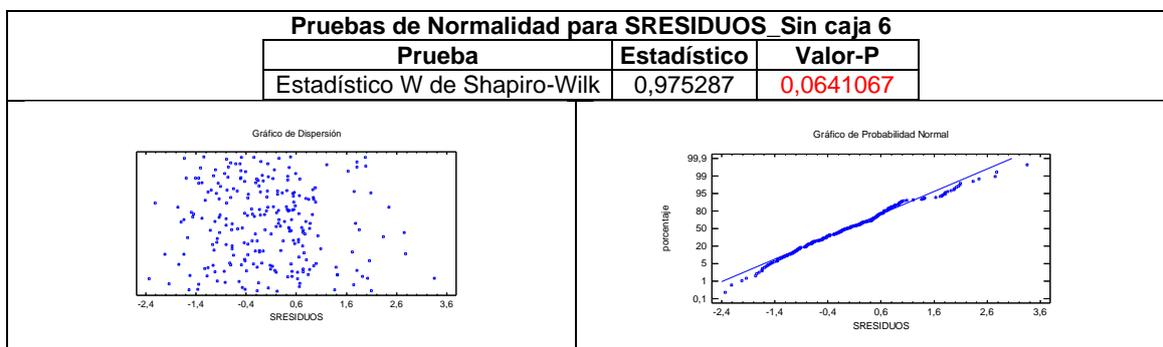


Figura a.5. Residuos para la función lineal de la influencia de la densidad anhidra en la dureza a carrera constante en ausencia de la caja 6.

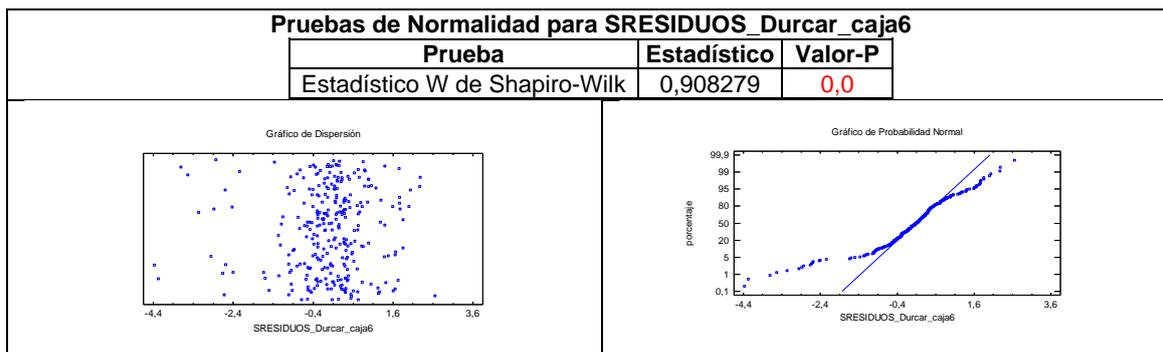


Figura a.6. Residuos para la función lineal de la influencia de la densidad anhidra en la dureza a carrera constante en presencia de la caja 6.

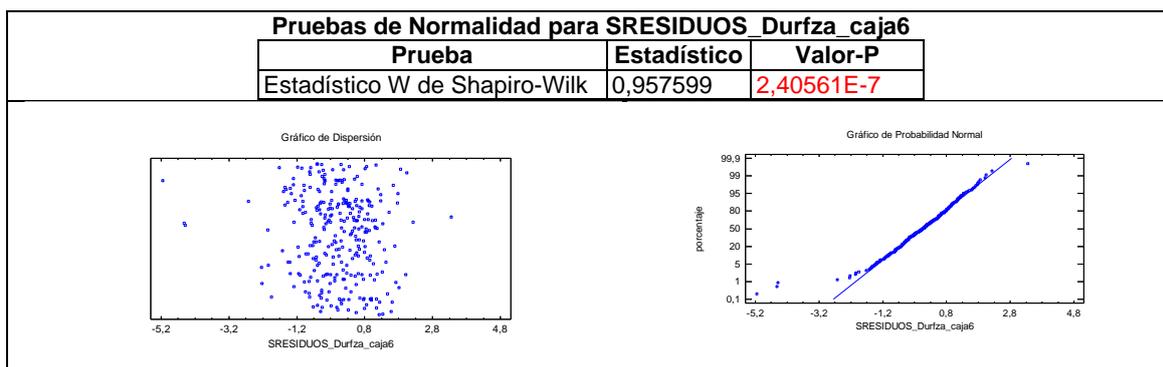


Figura a.7. Residuos para la función inversa de x de la influencia de la densidad anhidra en la dureza a fuerza constante en presencia de la caja 6.

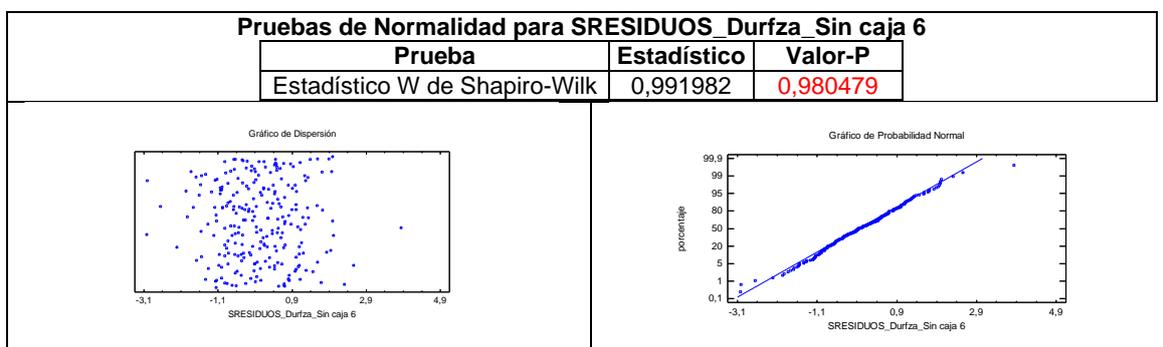


Figura a.8. Residuos para la función inversa de x de la influencia de la densidad anhidra en la dureza a fuerza constante en ausencia de la caja 6.

▪ **Relación entre las dos durezas.**

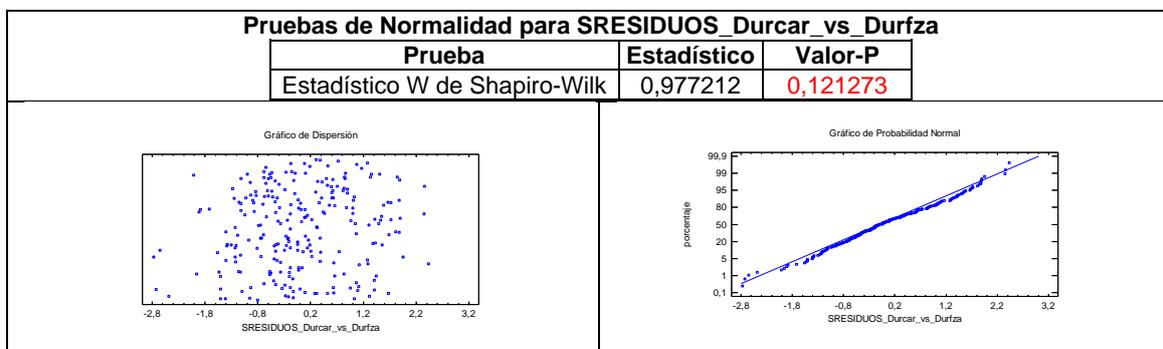


Figura a.9. Residuos para la función exponencial de la relación entre las dos durezas.

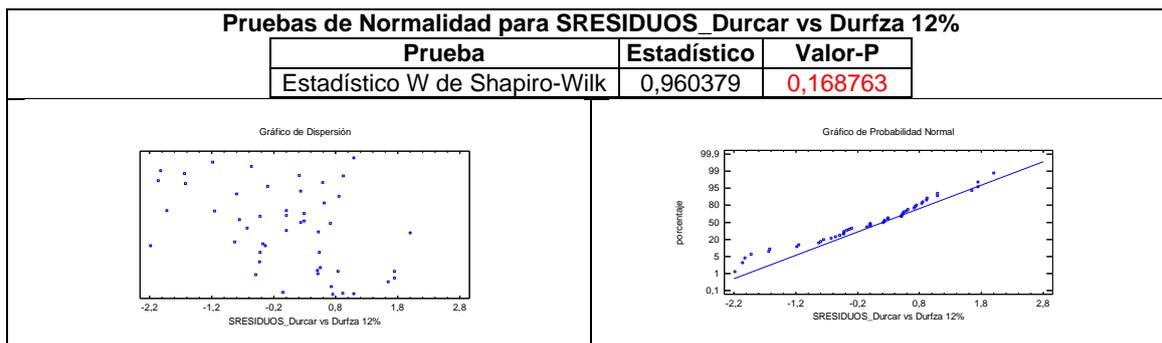


Figura a.10. Residuos para la función exponencial de la relación entre las dos durezas al 12% de humedad.

- **Relación de la dureza con la densidad anhidra y la humedad.**

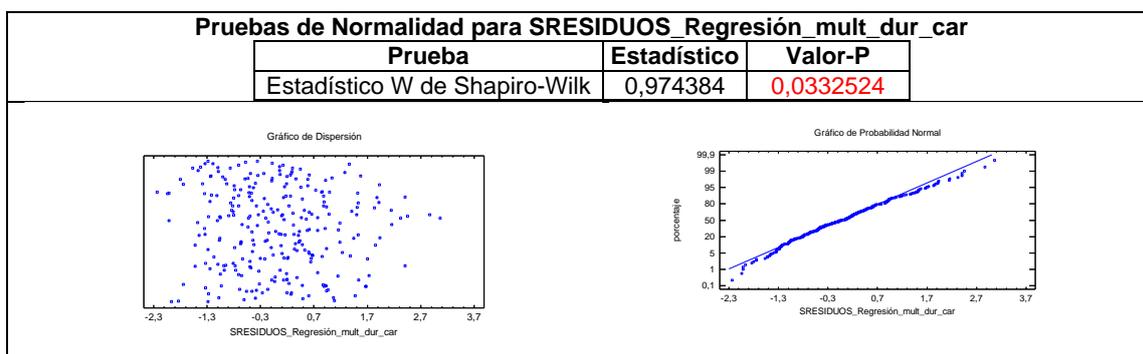


Figura a.11. Residuos para la regresión múltiple de dureza a carrera constante en función de la densidad anhidra y la humedad.

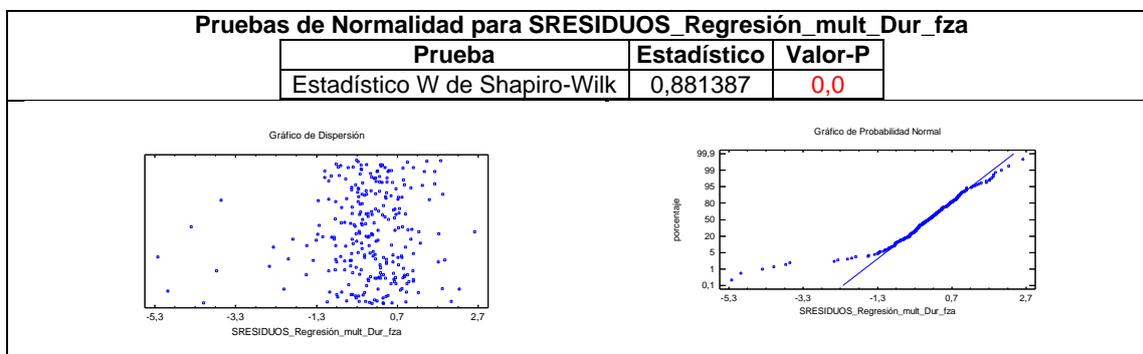


Figura a.12. Residuos para la regresión múltiple de dureza a fuerza constante en función de la densidad anhidra y la humedad.