

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LA
DENSIDAD EN MADERA DE PLANTACIONES
DE DOS ESPECIES FORESTALES**

Presentado por:

Piero Israel Panebra Salirrosas

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú
2019

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por el ex-alumno de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. **PIERO ISRAEL PANEBRA SALIRROSAS**, intitulado “**EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE LA DENSIDAD EN MADERA DE PLANTACIONES DE DOS ESPECIES FORESTALES**”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de

En consecuencia queda en condición de ser considerado APTO y recibir el título de INGENIERO FORESTAL.

La Molina, 7 de Diciembre de 2018

.....
Mg. Sc. Manuel Chavesta Custodio
Presidente

.....
PhD. Carlos Reynel Rodríguez
Miembro

.....
Mg. Sc. Miguel Meléndez Cárdenas
Miembro

.....
Mg. Sc. Moisés Acevedo Mallque
Asesor

.....
Mg. Sc. Luis Shuseki Yoza Yoza
Coasesor

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mis padres Juan y Marina por siempre creer en mí

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento

Al profesor Moisés Acevedo por su disposición y paciencia durante el proceso y culminación de esta investigación.

A profesor Luis Yoza por sus aportes claves y palabras de aliento en todo momento.

A mi asesor externo el Dr. José Eloy Cuellar Bautista, por la confianza brindada para desarrollar este tema de investigación.

Al Programa Nacional de Estudios e Investigación Para el Desarrollo Forestal y Cambio Climático de la Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario del Instituto Nacional de Innovación Agraria

Al proyecto 121_PI “Innovación en el uso de las maderas mediante generación de tablas de, propiedades tecnológicas relacionada a edad utilizando métodos no destructivos en especies procedentes de plantaciones forestales de la región amazónica”; del Programa Nacional de Innovación Agraria.

A Fer por estar siempre conmigo, desde el comienzo hasta el final, mi brazo derecho, mi apoyo incondicional y motivación.

A mis padres, por su apoyo y comprensión durante este tiempo.

A mis hermanas, Nataly y Nadia, que de muchas maneras contribuyeron a la culminación de esta investigación.

A Jorge Ruiz y Rolando Montenegro, por apoyarme en la parte estadística; al Sr. Vicente Cuba, por su ayuda constante durante la fase de laboratorio.

A mis amigos Julio, Coco, Javier y Giancarlo por brindarme sus consejos y momentos de tranquilidad necesarios durante el desarrollo de la investigación

A Haru y Yanett por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias adquiridas.

Finalmente a todas las personas que me han apoyado de una u otra manera durante todas las etapas de la presente investigación.

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la aplicación del Pilodyn como método no destructivo para determinar la densidad a distintas condiciones de humedad. La determinación de la densidad por método destructivo, y de los distintos contenidos de humedad a los que se evaluó, se realizó según lo indicado en sus respectivas Normas Técnicas Peruanas. La muestra en estudio consistió en un total de 187 probetas de dimensiones 5 x 5 x 8 cm, elaboradas a partir de madera de la base de dos árboles de Tornillo *Cedrelinga cateniformis*, y 210 probetas de dimensiones 2,5 x 2,5 x 10 cm elaboradas a partir de madera de la base, del medio y del ápice de dos árboles de Capirona *Calycophyllum spruceanum*. A estas probetas se les determinó la densidad, por el método de peso e inmersión, y la profundidad de penetración con Pilodyn en cada una de las tres condiciones de humedad: saturada, equilibrio y anhidra. Los resultados obtenidos para Tornillo muestran que existen diferencias significativas entre las penetraciones con Pilodyn a distintas condiciones de humedad, excepto entre las condiciones de equilibrio y anhidro, lo cual estaría explicado por la composición anatómica que presenta la madera en mención. En el caso de Capirona se determinó que existen diferencias significativas entre las condiciones de humedad para cada nivel longitudinal, siendo el nivel longitudinal poco influyente en la variabilidad de los resultados obtenidos. Se encontró relación significativa entre la densidad y la penetración con Pilodyn para ambas especies, obteniéndose coeficientes de correlación y de determinación aceptables, excepto para la condición de humedad de equilibrio en Capirona.

Palabras clave: Propiedades de la madera, penetrómetro, densidad, latifoliadas, variación longitudinal.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura	3
1. Tornillo	3
1.1. Clasificación taxonómica.....	3
1.2. Descripción botánica	3
1.3. Distribución y hábitat.....	4
1.4. Características de la madera.....	4
1.4.1. Anatomía.....	5
1.4.2. Propiedades físico - mecánicas.....	7
1.4.3. Usos	9
2. Capirona	10
2.1. Clasificación taxonómica.....	10
2.2. Descripción botánica	10
2.3. Distribución y hábitat.....	10
2.4. Características de la madera.....	11
2.4.1. Anatomía.....	11
2.4.2. Propiedades físico - mecánicas.....	13
2.4.3. Usos	13
3. Variabilidad de la densidad	14
4. Métodos no destructivos	16
4.1. Determinación de la densidad con pilodyn.....	17
4.1.1. Antecedentes de estudios sobre estimación de densidades mediante pilodyn.....	19
III. Materiales y Métodos	21
1. Zona de estudio	21
2. Lugar de ejecución de los ensayos	21
3. Materiales y equipos	24
3.1. Especie.....	24
3.2. Materiales.....	24
3.2.1. De Campo.....	24
3.2.2. De Laboratorio	24
3.3. Equipos.....	25
3.3.1. De campo	25
3.3.2. De laboratorio.....	25
3.4. Metodología.....	26
3.4.1. Colección y selección de muestras	26
3.4.2. Elaboración de probetas	28
3.4.3. Acondicionamiento de muestras	29
3.4.4. Ensayos de laboratorio	30
3.4.5. Procesamiento y análisis de datos.....	31
IV. Resultados y discusión	33
1. Densidad	33
1.1. Tornillo.....	33
1.2. Capirona.....	34
2. Estimación de la densidad con pilodyn	38
2.1. Tornillo.....	38
2.1.1. Relación entre la densidad y penetración.....	41

2.2.	Capirona.....	45
2.2.1.	Relación entre la densidad y penetración.....	51
3.	Comparación con otros estudios realizados.....	56
V.	Conclusiones.....	57
VI.	Recomendaciones	59
VII.	Referencias bibliográficas.....	61
VIII.	Anexos.....	65

Índice de tablas

	Página
Tabla 1: Densidad básica de Tornillo procedente de Bosque natural y plantaciones según varios autores.....	8
Tabla 2: Densidades de Tornillo obtenidas a distintas condiciones de humedad procedentes de plantaciones	9
Tabla 3: Densidad básica de Capirona procedente de Bosque natural y plantaciones según varios autores.....	13
Tabla 4: Densidad obtenida a distintas condiciones de humedad para plantación de 9 años.....	13
Tabla 5: Datos técnicos del equipo Pilodyn utilizado	17
Tabla 6: Datos de ambas plantaciones	24
Tabla 7: Cantidad de probetas obtenidas para las especies en estudio	29
Tabla 8: Valores de Densidad obtenidos para cada condición de humedad	33
Tabla 9: Densidades obtenidas para distintos autores	33
Tabla 10: Valores de densidad obtenidos para cada condición de humedad y nivel longitudinal	34
Tabla 11: Densidades obtenidas para distintos autores	34
Tabla 12: Prueba de Kruskal – Wallis para niveles longitudinales en cada condición de humedad.....	35
Tabla 13: Valor promedio y coeficiente de variación de la profundidad de penetración, por orientación de corte y condición de humedad.	38
Tabla 14: ANOVA entre penetración tangencial y radial para Tornillo.....	38
Tabla 15: Valores promedio para penetración del Pilodyn en distintas condiciones de humedad.....	39
Tabla 16: Prueba de Kruskal Wallis para condiciones de humedad	39
Tabla 17: Ecuaciones obtenidas para modelos de regresión lineal para densidad	41
Tabla 18: Valor promedio y coeficiente de variación de la profundidad de penetración , por orientación , nivel y condición de humedad.....	45
Tabla 19: ANOVA entre penetración tangencial y radial para Capirona	46
Tabla 20: Valor promedio y coeficiente de variación para penetración por niveles para cada condición de humedad.....	47
Tabla 21: ANOVA y prueba de Tukey para penetración a diferentes niveles longitudinales en cada condición de humedad	47
Tabla 22: Prueba de Kruskal- Wallis para condiciones de humedad, en cada nivel longitudinal.....	48

Tabla 23:	Ecuaciones obtenidas para modelos de regresión lineal para densidad	52
-----------	---	----

Índice de figuras

	Página
Figura 1: Corte tangencial, Tornillo de 15 años.....	5
Figura 2: Corte Radial, Tornillo de 29 años	6
Figura 3: Corte tangencial, mostrando floema incluido en Tornillo de 15 años.....	6
Figura 4: Corte tangencial, Capirona	12
Figura 5: Corte radial, Capirona	12
Figura 6: Partes del Pilodyn y accesorios.....	18
Figura 7: Mapa de ubicación de parcela de Tornillo	22
Figura 8: Mapa de ubicación de parcela de Capirona	23
Figura 9: Piodyn 6J Forest y accesorios.....	26
Figura 10: Evaluación de árboles de Tornillo.....	27
Figura 11: Evaluación de árboles de Capirona	27
Figura 12: Niveles longitudinales en árbol en pie.....	28
Figura 13: Evaluación de probeta de Tornillo en condición saturada con Pilodyn	30
Figura 14: Diagrama de cajas con muesca en la mediana para densidad saturada a distintos niveles longitudinales	36
Figura 15: Densidad promedio para Tornillo y Capirona.....	37
Figura 16: Diagrama de cajas con muesca en la mediana para densidad promedio en tres condiciones de humedad	40
Figura 17: Modelo para la densidad saturada antes del ajuste y penetración con Pilodyn en condición saturada.....	42
Figura 18: Modelo 1 para densidad saturada y penetración con Pilodyn en condición saturada	42
Figura 19: Modelo 3 para densidad y penetración con Pilodyn en condición de equilibrio	43
Figura 20: Modelo 4 para densidad y penetración con Pilodyn en condición anhidra	44
Figura 21: Diagrama de cajas con muesca en la mediana para Pilodyn promedio en el nivel apical a distintas condiciones de humedad	49
Figura 22: Resumen penetración promedio con Pilodyn para Tornillo y Capirona	50
Figura 23: Modelo 8 para densidad saturada y penetración con Pilodyn en condición saturada	51
Figura 24: Modelo 9 para densidad en equilibrio y penetración del Pilodyn en condición de equilibrio.....	53

Figura 25: Modelo 10 para densidad anhidra y penetración con Pilodyn en condición anhidra	54
---	----

Índice de anexos

	Página
Anexo 1 Constancia de identificación de la especie.....	65
Anexo 2 Análisis de varianza de las pruebas no destructivas y destructivas entre los árboles de las especies en estudio	66
Anexo 3 Contenido de humedad y altura para los factores condición de humedad y nivel longitudinal	67
Anexo 4 Datos de DAP, altura total y altura comercial tomados en campo para Tornillo.....	68
Anexo 5 Datos de DAP, altura total y altura comercial tomados en campo para Capirona	69
Anexo 6 Fotografías de la evaluación.....	70

I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda y la limitada disponibilidad de madera como materia prima proveniente del bosque natural, incentiva el establecimiento de plantaciones forestales con fines industriales como proveedor de madera, cuya calidad debe ser controlada y corroborada.

Estas dos condiciones, implican la aplicación y validación de la eficiencia de tecnologías no destructivas en maderas provenientes de plantaciones con madera tropical, pues son utilizadas en otras latitudes como medios de control de calidad de la madera tanto en árbol en pie, trozas y productos.

Un parámetro relacionado con la calidad de la madera es la densidad, ya que es una de las propiedades físicas más importantes, que se encuentra muy relacionada con las propiedades mecánicas, la dureza y el rendimiento en producción de tableros, madera sólida y pulpa celulósica (Vignote *et al.* 2013). Esta propiedad física se puede estimar haciendo uso del Pilodyn, equipo no destructivo que la mide a partir del índice de penetración de una aguja en la madera. (Costa 2012). Sin embargo, es conocido que el valor de la densidad depende de las condiciones de humedad de la madera. Adicionalmente la relación densidad – Pilodyn facilitará la determinación del MOE dinámico por métodos no destructivos, tanto en árboles en pie como en trozas.

El presente estudio evalúa el efecto de la humedad en la determinación de la densidad con Pilodyn en tres condiciones de humedad y la eficiencia de éste método en dos maderas tropicales de gran importancia en el mercado nacional: Tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) y Capirona (*Calycophyllum spruceanum*), provenientes de plantaciones forestales de 20 y 19 años respectivamente.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. TORNILLO

1.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Esta clasificación es dada según Flores (2018)

Familia botánica : Fabaceae

Nombre científico : *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke

Nombres comunes : “Tornillo”

Sinónimos botánicos: *Piptadenia catenaeformis* Ducke, *Pithecellobium catenaeformis* (Ducke) L.

1.2. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Según López (1970), el árbol de tornillo forma parte del estrato dominante del bosque donde se desarrolla, su altura varía entre 25 a 40 metros dependiendo de la calidad de sitio, pudiendo llegar hasta los 70 metros de altura (Flores 2018). Su altura comercial está comprendida entre los 15 a 25 metros y el diámetro a la altura de pecho 60 y 150 cm. Presenta una diferencia de 22 a 24 cm entre el diámetro máximo y mínimo (ahusamiento).

Reynel *et al.* (2003) describe que el árbol tiene una corteza externa agrietada a fisurada, color marrón pardo a rojizo, con placas de ritidoma de unos 3-5 x 8-13 cm; ritidoma coriáceo. La corteza muerta se desprende en placas rectangulares por encima de las aletas, la cual es leñosa, corchosa y de 1 cm de espesor. Corteza interna homogénea, color crema a rosado blanquecino, sin secreciones. Tiene un espesor de 0,5 cm, presenta textura arenosa y sabor dulce. Ramitas terminales con sección circular, color marrón claro cuando secas, de unos 5-10 mm de diámetro, lenticeladas, glabras.

Hojas compuestas bipinnadas, alternas y dispuestas en espiral, de unos 30-40 cm de longitud, el peciolo de unos 6-30 cm de longitud, las hojas usualmente con 4 pinas, las zonas de articulación de las pinas con una glándula de unos 2-5 mm de diámetro, las láminas

foliares ovadas, asimétricas, de unos 4-15 cm de longitud y 2-9 cm de ancho, enteras, el ápice acuminado, la base aguda e inequilátera, la nervación pinnada con 5-7 pares de nervios secundarios, los nervios terciarios muy paralelos y transversales al nervio central, las hojas glabras.

Inflorescencias en panículas de 12-30 cm de longitud conteniendo numerosas cabezuelas agrupadas en manojos, las cabezuelas de 2,5-3,5 cm de longitud con pedúnculos de 1-2 cm de longitud. Flores pequeñas, hermafroditas, de unos 1- 1,5 cm de longitud, actinomorfas, con cáliz y corola presentes, el cáliz pequeño, de 1-2 mm de longitud, la corola blanquecina, de 4-5 mm de longitud, tubular, con 5 dientes; androceo con muy numerosos estambres de 1-1,5 mm de longitud, el pistilo único con un estilo largo y estigma obsoleto.

Frutos legumbres muy largas y aplanadas, de 30-40 cm de longitud y 2-3 cm de ancho, con 6-15 semillas, la legumbre estrechada entre las semillas y revirada helicoidalmente.

1.3. DISTRIBUCIÓN Y HÁBITAT

Su distribución abarca la región amazónica, hasta los 1200 msnm. Presente en áreas de pluviosidad elevada y constante (Reynel *et al.* 2003).

En Perú se encuentran en los departamentos de Loreto (Iquitos, Yurimaguas), Ucayali (Pucallpa), Huánuco (Tingo María), Cuzco (Urubamba), San Martín y Madre de Dios (Aróstegui 1973).

López (1970), señala que posee una amplia distribución ecológica, encontrándose además en las formaciones de bosque húmedo tropical (bh-T), bosque muy húmedo subtropical (bmh-ST) y bosque seco tropical (bs-T), dentro de una gran variedad de suelos y clima.

1.4. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

La madera recién cortada presenta albura de color rosado y duramen de color rojizo claro.

Acevedo y Kikata (1994) nos mencionan que en la madera en condición seca al aire, la albura es de color rosado claro y el duramen rosado oscuro, anillos de crecimiento poco diferenciados limitados por bandas oscuras en forma irregular. Grano recto a ligeramente entrecruzado, textura gruesa y brillo medio. Presenta peso específico básico de 0,45. No presenta veteado.

1.4.1. ANATOMÍA

La madera presenta porosidad difusa, los poros se pueden apreciar a simple vista, solitarios de forma redonda y múltiples radiales escasos de 2 a 4; con 1 a 5 poros/mm² (Acevedo y Kikata 1994). Silva (2005) encontró en una plantación de 15 años un promedio de 2 poros/mm², y para una de 29 años 1 poro/mm²; sin embargo estadísticamente la diferencia no es significativa.

En un estudio realizado por Silva (2005) a plantaciones de tornillo de 15 años y 29 años, se encontró un diámetro tangencial promedio 237 μm y una longitud promedio de elementos vasculares de 315 μm para la plantación de 15 años, y un diámetro tangencial promedio de 267 μm y una longitud promedio de elementos vasculares de 306 μm para la de 29 años; encontrándose diferencia estadísticamente significativa entre edades para diámetro tangencial y no para la longitud promedio.

Según Acevedo y Kikata (1994), el parénquima es paratraqueal vasicéntrico, no estratificadas y con presencia de inclusiones gomosas. Silva (2005) también encontró gomas en el parénquima longitudinal, radios y vasos; mostrando además abundante floema incluido.

Lo mencionado en anatomía se muestra en la Figura 1, 2 y 3.

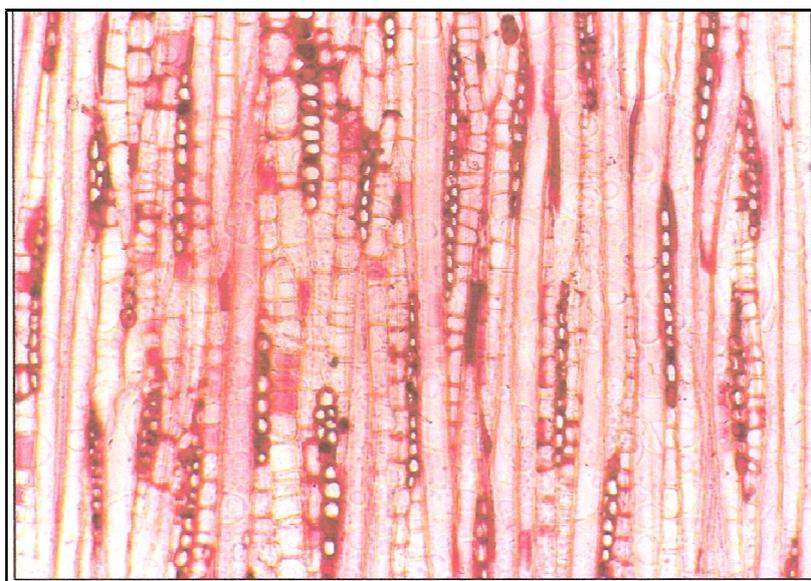


Figura 1: Corte tangencial, Tornillo de 15 años

Fuente: Silva (2005)

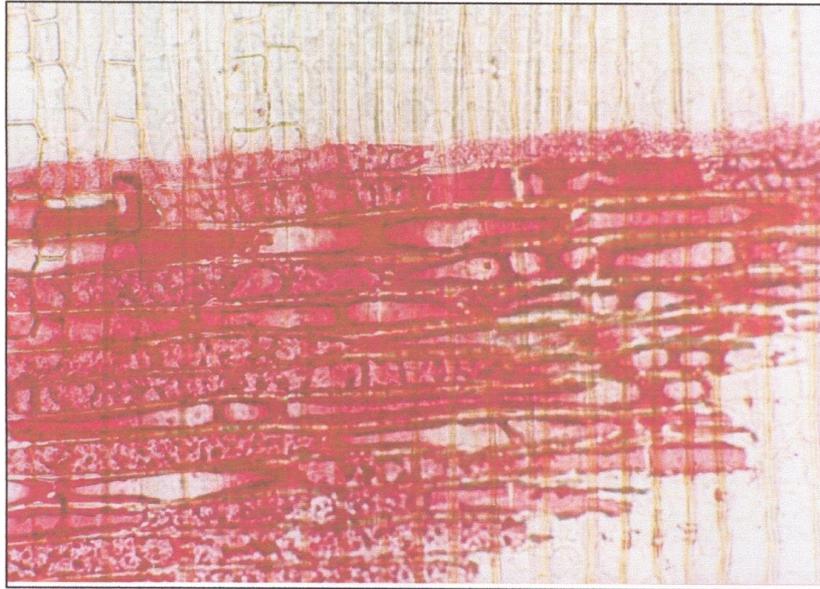


Figura 2: Corte Radial, Tornillo de 29 años

Fuente: Silva (2005)



Figura 3: Corte tangencial, mostrando floema incluido en Tornillo de 15 años

Fuente: Silva (2005)

Silva (2005) encontró en ambas plantaciones, de 15 y 29 años, abundante parénquima apotraqueal difuso y parénquima paratraqueal vasicéntrico, siendo el parénquima en la plantación de 15 años uniseriado, y en la de 29 años uniseriado de 2 a 3 células. En el corte longitudinal los elementos son alargados verticalmente, no estratificados.

Fibras libriformes, no estratificadas; el diámetro total es de 24 μm , el grosor de pared celular 3 μm y la longitud varía entre 1443 y 1454 μm (Acevedo y Kikata 1994).

El diámetro total de las fibras para las plantaciones de 15 años y 29 años fueron de 29 y 25 μm , el grosor de la pared para la plantación de 15 años es de 2,35 μm y para la de 29 años es de 2,28 μm . El diámetro promedio de lumen para las plantaciones de 15 y 29 años fue de 24 y 21 μm respectivamente. La longitud promedio para las edades de 15 y 29 años fue 1318 y 1265 μm respectivamente (Silva 2005).

1.4.2. PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS

Uno de los primeros estudios que se realizaron en madera de Tornillo fue el de Aróstegui (1982), donde determinó las propiedades físicas y mecánicas de madera proveniente de un Bosque natural. Silva (2005) realizó un estudio de propiedades físicas y anatómicas de la misma especie proveniente de plantaciones experimentales de 15, 24 y 29 años en Jenaro Herrera. Condori (2007) complementó el estudio realizado por Silva (2005) determinando las propiedades mecánicas de dicha plantación para las mismas edades.

Durán (2003) y Soudre (2004), evaluaron la influencia de cuatro factores de crecimiento en la variación de las propiedades físicas y mecánicas de Tornillo en plantaciones provenientes de la Estación Experimental Alexander Von Humboldt. Estos factores de influencia fueron la edad, el tipo de regeneración, suelo y fisiografía. Se utilizaron los resultados de una de las faja de 10 m, la cual presenta un suelo Acrisol y plano (Tabla 1).

Soudre (2004), nos dice que el factor que más influye en la densidad básica es la edad, seguido del suelo, fisiografía y en menor proporción del tipo de regeneración.

Villa (2009) analizó una plantación de 22 años en fajas de enriquecimiento de 5m de Tornillo en la Estación Experimental Alexander Von Humboldt donde determinó sus propiedades físicas y mecánicas. En este estudio analizó 5 árboles para ver si existe diferencia significativa longitudinalmente (diferentes alturas) y entre árboles. Se demostró que sólo existe diferencia significativa para los valores de densidad a nivel longitudinal; para

él análisis de la especie (entre árboles) no presentan diferencias significativas para las propiedades físicas.

Vega (2011), realizó un estudio evaluando las propiedades físicas-mecánicas de una plantación a campo abierto de Tornillo de 20 años de edad procedente del Bosque Alexander Von Humboldt. La evaluación se realizó por niveles de altura y de cercanía a la médula. La evaluación se realizó en condición verde a un contenido de humedad aproximado de 65 por ciento para las propiedades físicas.

En la Tabla 1 se muestra las densidades básicas obtenidas en los distintos estudios de propiedades físicas anteriormente mencionados, y en la Tabla 2 las densidades obtenidas a distintas condiciones de humedad a nivel basal.

Tabla 1: Densidad básica de Tornillo procedente de Bosque natural y plantaciones según varios autores

<i>Edad (años)</i>	<i>Densidad Básica (g/cm³)</i>	<i>Autor</i>
Bosque natural	0,45	Arostegui (1982)
10	0,35	Soudre (2004)
15	0,41	Silva (2005)
24	0,28	
29	0,42	
22	0,43	Villa (2009)
20	0,38 (*)	Vega (2011)
	0,41 (**)	

**Densidad promedio obtenida a nivel Longitudinal*

***Densidad promedio obtenida a nivel transversal (De corteza a médula)*

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 2: Densidades de Tornillo obtenidas a distintas condiciones de humedad procedentes de plantaciones

<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Promedio</i>	<i>Contenido de humedad (%)</i>	<i>Autor</i>
Saturada	0,66	54,1	Villa (2009)
Equilibrio	0,52	13,7	
Anhidra	0,47	-	
Saturada	0,65	65,6	Vega (2011)
Anhidra	0,44	-	

FUENTE: Villa (2009) y Vega (2011)

Según la clasificación de maderas del Perú dada por Aróstegui (1982), la madera de Tornillo de bosque natural está clasificada como una madera de densidad media, caracterizándose por tener una durabilidad natural regular. Para el caso de madera de Tornillo de plantaciones estaría clasificada como una madera de densidad baja a media, a excepción de la plantación de 24 años estudiada por Silva (2005), la cual estaría clasificada como una madera de densidad muy baja.

1.4.3. USOS

Aróstegui (1982) y Vega (2011) consideran a la madera de Tornillo ,debido a sus características físico- mecánicas y requisitos de uso, como una madera fácil para aserrar, buena para el cepillado, torneado y taladrado; por lo cual se recomienda esta madera para construcción de carpintería de obra no estructural, mueblería, cajonería liviana, molduras y revestimiento.

2. CAPIRONA

2.1. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Esta clasificación es dada según Flores (2018)

Familia botánica : Rubiaceae

Nombre científico : *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) Hook. f. ex K. Schum.

Nombres comunes : “Capirona”, “Capirona del bajo”, “Capirona de hoja chica”

Sinónimos botánicos : *Eukylista spruceana* Benth.

2.2. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Esta descripción botánica es dada por Reynel *et al.* (2003)

Árbol de 50-120 cm de diámetro y 20-35 m de alto, con el fuste muy recto, cilíndrico, regular, la copa en el último tercio, la base del fuste recta. Corteza externa lisa, color verde, homogéneo, terso y lustroso, provista de ritidoma papiráceo rojizo que se desprende en placas grandes, irregulares, revelando la superficie verdusca de la corteza. Corteza interna homogénea, muy delgada, de 1- 2 mm espesor.

Presenta hojas simples, opuestas decusadas, elípticas u oblongas de base obtusa, la nervación pinnada; inflorescencias cimas terminales de 10-15 cm de longitud, provistas de numerosas flores.

Flores hermafroditas, con cáliz y corola presentes, las flores de 1-1.5 cm de longitud. Los frutos son cápsulas pequeñas, de 5-8 mm de longitud, pubescentes en su superficie; abren en dos valvas cuando maduran, las semillas diminutas, aladas y alargadas, con el embrión en posición central.

2.3. DISTRIBUCIÓN Y HABITAT

Toda la Amazonía, hasta el sur de Brasil y Bolivia, debajo de los 1200 msnm. Es común en zonas de bosques secundarios, aunque se le encuentra también en los bosques primarios. (Reynel *et al.* 2003)

Chavesta (1995) menciona que en el Perú, esta especie se distribuye en los departamentos de Loreto (Yurimaguas e Iquitos), Ucayali (Pucallpa) y Huánuco (Tingo María); señala además

que esta especie se encuentra asociada con *Manilkara bidentata*, *Pourouma cecropiaefolia*, *Guarea trichiloides*, *Genipa americana* y otras.

Reynel *et al.* (2003) nos dice que a esta especie se le observa en ámbitos con pluviosidad elevada y constante, pero también en zonas con una estación seca marcada. Es una especie heliófita, frecuente en bosques secundarios pioneros y tardíos, en suelos mayormente limosos a arenosos, aluviales, fértiles, a veces temporalmente inundables y en las zonas ribereñas; tolera la pedregosidad elevada.

2.4. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

El tronco de Capirona recién cortado presenta albura y duramen poco diferenciado, la primera de color blanco cremoso y el segundo de color blanco pardo con vetas de color marrón claro. Acevedo y Kikata (1994) mencionan que, en condición seca, su albura es de color blanco cremoso y el duramen blanco amarillento y posee anillos de crecimiento diferenciados por bandas oscuras de forma regular.

Presenta grano recto e irregular, de textura uniforme y fina, brillo medio. No posee olor ni sabor (Aróstegui 1974).

2.4.1. ANATOMÍA

Chavesta (2005) indica que la madera presenta porosidad difusa con poros muy pequeños y numerosos, visibles con lupa de 10x, solitarios y múltiples radiales de 2 a 9 en proporción similar; parénquima indistinguible inclusive con lupa de 10x; radios no estratificados visibles con lupa de 10x.

Acevedo y Kikata (1994) describen que los vasos presentan diámetro tangencial de 39 a 145 μm y longitud entre 615 y 1190 μm ; platina de perforación poco a muy inclinada con perforación simple, punteado intervascular y radiovascular opuesto con puntuaciones ovaladas y abertura incluida. El parénquima es del tipo apotraqueal difuso y no estratificado. Posee radios heterogéneos tipo II, en algunos casos radios fusionados, no estratificados, con altura entre 144 y 470 μm . Presenta fibras libriformes no estratificadas con un diámetro total de 22 μm , el grosor de la pared celular es de 6 μm y su longitud varía entre 1,306 y 2,150 μm .

Al igual que Acevedo y Kikata (1994), Bustamante (2017) encontró una gran heterogeneidad en los componentes anatómicos de la madera dado por su amplio rango de valores en diámetro y longitud de vasos, altura de radios y longitud de fibras.

Lo mencionado en anatomía se muestra en las Figuras 4 y 5.

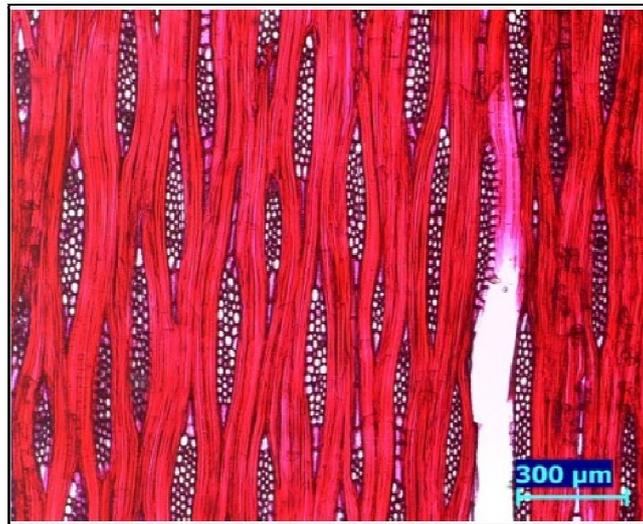


Figura 4: Corte tangencial, Capirona

Fuente: Bustamante (2017)



Figura 5: Corte radial, Capirona

Fuente: Bustamante (2017)

2.4.2. PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS

La determinación de propiedades de la madera de Capirona en el Perú se inició en bosques naturales en los estudios realizados por Aróstegui (1974) y Meléndez (1999). Posterior a estos estudios, se iniciaron estudios similares en plantaciones para determinar sus propiedades como es el caso de Sotelo (2006) y Pantigoso (2009). En la Tabla 3 y 4 se muestran las densidades obtenidas en éstos estudios.

Tabla 3: Densidad básica de Capirona procedente de Bosque natural y plantaciones según varios autores

<i>Edad (años)</i>	<i>Densidad Básica (g/cm³)</i>	<i>Autor</i>
Bosque natural	0,76	Aróstegui (1974)
Bosque natural	0,73	Meléndez (1999)
3	0,58	Sotelo (2006)
9	0,61	Pantigoso (2009)

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 4: Densidad obtenida a distintas condiciones de humedad para plantación de 9 años

<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Promedio</i>	<i>Contenido de humedad (%)</i>
Saturada	1,11	82,77
Equilibrio	0,75	19,7
Anhidra	0,69	-

FUENTE: Pantigoso (2009)

Para la clasificación de maderas de Perú dada por Aróstegui (1982), la Capirona de bosque natural es clasificada como una madera de densidad alta, teniendo una alta resistencia mecánica y buena durabilidad. Por otra parte la madera procedente de las plantaciones mencionadas estaría clasificada como madera de densidad media, con una regular resistencia mecánica y durabilidad.

2.4.3. USOS

Esta madera es usada extensamente para construcción rural, como puntales y travesaños. (Reynel *et al.* 2003)

Según Chavesta (2005), la madera de capirona puede ser usada para pisos, parquet, machihembrados, tarugos, construcciones pesadas, mangos de herramientas, ebanistería y artículos para productos lácteos.

3. VARIABILIDAD DE LA DENSIDAD

Para Kollman y Cote (1984), la variabilidad de la densidad de la madera se debe a diferencias en la estructura de ésta y a la presencia de factores externos. La estructura de la madera está caracterizada por los diferentes tipos de células, y en especial por el grosor de las paredes celulares. Factores genéticos, fisiológicos y mecánicos, así como factores ambientales, afectan la estructura de la madera y por ende su densidad. Finalmente, la posición en el fuste también tiene un efecto considerable en la densidad de la madera.

Los tratamientos silviculturales a los que son sometidos los árboles tienen un efecto en las propiedades de la madera, como en el caso de la densidad.

Para el estudio realizado por Navarrete *et al.* (2009) se analizó el efecto de la intensidad de poda y del raleo, en la variación de la densidad básica de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 10 años, intervenida a los 2 años y medio de establecida. Los resultados determinaron que el raleo afectó la densidad básica, presentando los rodales sin intervención, una densidad básica promedio menor que aquellos intervenidos; en cambio en aquellas unidades muestrales con poda, se presentaron los menores valores promedios para esta variable.

El distanciamiento y la fertilización de una plantación, son otros tratamientos silviculturales que afectan la densidad de la madera. Según De Jesus *et al.* (2017), en un estudio realizado a sistemas forestales de rotación corta de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* a los 2 años, se encontró que la densidad básica de la madera aumentó con la mayor dosis de fertilizante; de igual manera se encontró mayor densidad básica a mayor distanciamiento de la plantación.

En un estudio realizado por Evans *et al.* (1997) en eucalipto (*Eucalyptus sp.*), se encontró que la densidad tiende a aumentar desde la médula hacia la corteza, y desde la base hacia la copa. El autor menciona que para el diseño de un modelo de variación es importante tener un número de muestras adecuado para tener una mayor exactitud en los resultados.

Pantigoso (2009) encontró que en Capiroña (*Calycophyllum spruceanum*) de 9 años de edad, la densidad básica entre niveles longitudinales, presenta diferencia significativa; siendo la densidad básica encontrada en nivel basal la de mayor valor, lo cual se explica ya que el árbol necesita soportar los esfuerzos producto de factores externos como viento produciendo madera más densa que sirva como soporte desde la base.

La variabilidad del contenido de humedad de la madera tiene una gran influencia en varias propiedades de la madera no sólo mecánicas, sino también en algunas otras propiedades entre las que se encuentra la densidad. (De la Mata 2011)

Villa (2009) demostró que existe diferencia significativa en densidad básica, densidad saturada, densidad en equilibrio y anhidro, a nivel longitudinal; esto es como resultado de una evaluación a una plantación de 22 años en fajas de enriquecimiento de 5m de Tornillo (*Cedrelinga cateniformis*). Esta variación longitudinal de las densidades señaladas, es explicada por el autor debido a que en plantaciones los árboles se encuentran en un crecimiento competitivo, principalmente por luz.

En los resultados obtenidos por Vega (2011) en una plantación de 20 años de Tornillo (*Cedrelinga cateniformis*), la densidad saturada, básica y anhidra muestran una tendencia creciente desde el nivel basal al apical, observándose diferencias significativas, siendo en todos los casos los promedios menores en el nivel basal.

4. MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

La evaluación no destructiva de materiales consiste en la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de un material sin alterar sus capacidades de uso final. Dichas evaluaciones se basan en técnicas de pruebas no destructivas (NDT) para proporcionar información para estimar las propiedades del material evaluado (Ross 1992)

Según Ross (1992), las técnicas de prueba no destructivas para madera son diferentes a las técnicas que se utilizan en materiales isotrópicos homogéneos como metales, vidrio, plásticos y cerámica. En estos materiales diferentes de la madera, sus propiedades mecánicas son conocidas y controladas en los procesos de fabricación, por lo cual las NDT se utilizan para detectar la presencia de discontinuidades, vacíos o inclusiones; mientras que en la madera, estas irregularidades ocurren naturalmente y puede ser inducido adicionalmente por agentes del entorno.

Las técnicas NDT para madera se utilizan para evaluar como las irregularidades naturales e inducidas por el ambiente interactúan en una pieza de madera para evaluar sus propiedades mecánicas (Ross y Pellerin 1994).

Ross y Pellerin (1994), mencionan varias técnicas para evaluar de forma no destructiva materiales en base a madera, entre ellas la técnica de extracción de tornillos y la prueba con Pilodyn para detectar daños en la superficie de la madera. Cabe señalar que estas técnicas sirven también como indicadores de resistencia del material y su densidad (Fakopp Enterprise Bt. 2010)

La Técnica de extracción de Tornillos, consiste en un aparato que registra la máxima fuerza aplicada para arrancar tornillos previamente introducidos en la madera (Casado *et al.* 2005). Con los años el equipo para extracción de Tornillos ha ido disminuyendo su tamaño hasta llegar a ser un equipo portátil; sin embargo este equipo por los accesorios y su modo de uso, sigue siendo preferible su uso en piezas de madera y no para evaluaciones en campo (árbol en pie).

El Pilodyn por el contrario es un equipo más práctico tanto en su manejo, como en los accesorios que necesita para su correcto funcionamiento; además está diseñado para la evaluación en campo (árbol en pie), dado su tamaño, poco peso y fácil mantenimiento, lo que facilita su transporte y uso tanto en árbol en pie como en piezas de madera.

En un estudio realizado por Bobadilla *et al.* (2007) a un grupo de 395 vigas de gran escuadría para las especies *Pinus radiata D. Don*, *Pinus sylvestris L.* y *Pinus nigra Arn.*, donde se estimó la densidad con el método de arranque de tornillos y con el penetrómetro (Pilodyn); se encontró un mejor coeficiente de determinación para arranque de tornillos en *Pinus radiata D. Don* y *Pinus sylvestris L.*

Íñiguez (2007), encontró un coeficiente de determinación de 59 por ciento para profundidad de penetración con Pilodyn y de 64 por ciento para fuerza de arranque de Tornillo para las especies *Pinus radiata*, *Pinus sylvestris* y *Pinus nigra subsp. salzmannii*.

Debido a los estudios mencionados se puede decir que la Técnica de arranque de tornillos tiene mejores coeficientes de determinación que la penetración con Pilodyn. Si bien existe diferencia, ésta no es significativa; por lo cual por practicidad la evaluación con Pilodyn sigue siendo una técnica válida a utilizar para determinación de la densidad.

4.1. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD CON PILODYN

El Pilodyn (penetrómetro) es un equipo con manejo simple, ya que su funcionamiento consiste en disparar sobre la madera una varilla metálica percutora, impulsada por la fuerza elástica de un resorte. (Bobadilla *et al.* 2007). El equipo es considerado no destructivo ya que sólo realiza un pequeño orificio de 2,5 mm de diámetro y una profundidad máxima de 40 mm, dependiendo de la resistencia que oponga la madera, pudiendo utilizarse en árboles en pie. Las especificaciones de este equipo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Datos técnicos del equipo Pilodyn utilizado

Marca	TerraGes
Equipo	Pilodyn
Modelo	6J Forest
Energía de Impacto	6J (NM)
Profundidad de penetración	0-40 mm
Varilla Percutora	2,5 mm. diámetro x 80,2 mm
Dimensiones	420 mm largo y 50 mm diámetro
Peso	1,6 kg

Fuente: Comercial de Ingeniería DAGA S.L s.f.

Al ser un equipo diseñado para ser movlizado por su poco peso y tamao, este debe de limpiarse de forma regular y controlar si el percutor (5), la cabeza del percutor (2) o el gatillo (17) se han movido debido a los impactos generados. Las partes del Pilodyn mencionadas se muestran en la Figura 6.

Despu3s de 5000 impactos el percutor debe de ser cambiado y nunca se le debe de echar grasa o aceite (Hansen 2000)

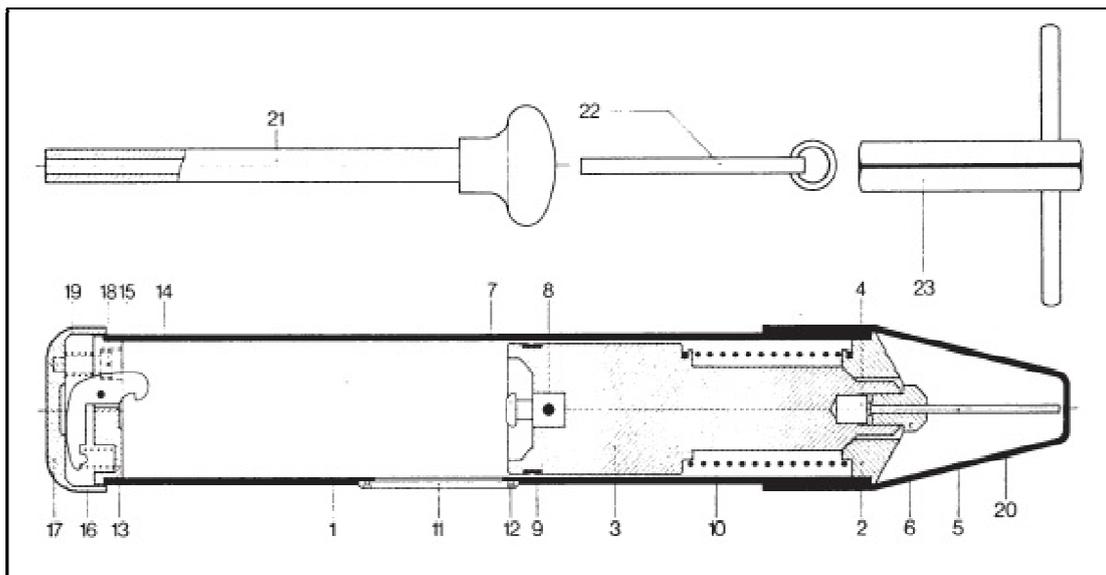


Figura 6: Partes del Pilodyn y accesorios.

FUENTE: Hansen (2000)

En la Figura 6 se pueden ver las partes y accesorios del Pilodyn, los cuales son: 1. Carcasa, 2. Cabeza golpeador, 3. Golpeador, 4. Pin espaciador, 5. Pin golpeador, 6. Tuerca, 7. Pin de retenci3n, 8. Pin estriado, 9. Anillo indicador, 10. Muelle de carga, 11. Apertura de escala, 12. Tornillo cil3ndrico, 13. Base, 14. Trinquete, 15. Perno cil3ndrico, 16. Muelle de gatillo, 17. Disparador, 18. Tornillo cil3ndrico, 19. Resorte de compresi3n, 20. Tapa protectora, 21. Varilla de carga, 22. Pin de bloqueo, 23. Llave hexagonal

La penetraci3n generada con el Pilodyn tiene una relaci3n con la resistencia mec3nica de la madera, la cual a su vez se encuentra estrechamente relacionada con el contenido de humedad. A medida que la madera va perdiendo humedad la resistencia mec3nica permanece pr3cticamente constante, hasta que se elimina el agua libre en la madera (punto de saturaci3n de las fibras, CH=30 por ciento); por debajo de este contenido de humedad la resistencia mec3nica de la madera aumenta progresivamente con el descenso de la humedad (De la Mata 2011).

Otro factor que estaría relacionado con la profundidad de penetración con Pilodyn serían los anillos de crecimiento. Según la investigación realizada por Íñiguez (2007), al realizar la penetración con Pilodyn en cara tangencial y en cara radial de las piezas de madera evaluada, no se encontró ninguna certidumbre sobre la posible influencia de los anillos de crecimiento en la profundidad de penetración, por lo cual recomienda utilizar el promedio de ambas lecturas como parámetro estimador de la densidad.

Este equipo es utilizado para obtener información de árboles en pie, como son sus propiedades mecánicas y físicas; la información obtenida sirve como criterio para seleccionar los árboles a aprovechar. Es usado también, en inspecciones en los elementos estructurales de edificios existentes para poder determinar la densidad.

4.1.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SOBRE ESTIMACIÓN DE DENSIDADES MEDIANTE PILODYN

Se han realizado distintos estudios para el uso de Pilodyn como estimador de la densidad, aplicándose el uso de este equipo no destructivo en madera en uso, árboles en pie y madera aserrada. A continuación se resumirán en orden cronológico algunos de los principales estudios realizados.

En el estudio desarrollado por Bobadilla *et al.* (2007), se evaluaron vigas de distintas especies de Pino con Pilodyn tanto en dirección radial como tangencial, acondicionadas en una cámara climática a 20 ± 2 °C y 65 ± 5 por ciento de HR. Como resultado de utilizar las medias tangenciales y radiales de la penetración con Pilodyn para relacionarlo con la densidad, se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 40 por ciento para *Pinus radiata* D. Don, 35 por ciento para *Pinus sylvestris* L. y 49 por ciento para *Pinus nigra* Arn.

Monteoliva (2011) evaluó árboles en pie con Pilodyn para obtener una ecuación de ajuste (calibración) y poder predecir la densidad básica de la madera en pie. Esta evaluación se realizó a árboles clonales de Sauces (*Salix sp.*) en 2 rangos de edades 7 – 8 años y 10 – 14 años, en diferentes sitios. La densidad básica promedio que se obtuvo fue de $0,41 \text{ g/cm}^3$ y una penetración promedio de 15 mm. Los coeficientes de determinación (R^2) más altos se obtuvieron para todos los clones y sitios, y para todos los clones en el sitio afectado por inundaciones recurrentes, con 50 por ciento y 56 por ciento respectivamente.

En un estudio realizado por Costa (2012), se utilizó el Pilodyn para determinar la resistencia a la penetración en probetas de compresión y hallar la correlación para determinar la densidad aparente al 12 por ciento de contenido de humedad para siete especies forestales. La densidad promedio obtenida fue de $0,87 \text{ g/cm}^3$ y la penetración promedio para dirección longitudinal fue de 13,6 mm, para dirección Tangencial 10,8 mm y para dirección Radial 10,8 mm. Se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 76 por ciento, 68 por ciento y 59 por ciento para las direcciones longitudinal, tangencial y radial, respectivamente; por lo cual se considera este un método eficiente para inferir la densidad aparente.

Para Cañas (2013), la evaluación con Pilodyn resulta una alternativa válida para determinar la densidad a partir de madera aserrada, ya que al evaluar 40 muestras para cada una de las 18 especies forestales, obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 74,38 por ciento. Este R^2 se obtuvo al realizar un análisis de regresión lineal entre la densidad básica y la penetración al 6 por ciento de contenido de humedad. El valor promedio de densidad básica fue de 0,6 y la penetración promedio, entre tangencial y radial, de 11,34 mm.

Giraldo *et al.* (2014) utilizó el Pilodyn para evaluar 100 árboles clonales en pie de la especie *Eucalyptus pellita* y se determinó su densidad en condición verde a través de las rodajas (discos) obtenidas de los árboles. Se obtuvo una densidad promedio de $0,58 \text{ g/cm}^3$ y una penetración promedio de 14,5 mm. Con los datos de penetración con Pilodyn y densidad verde obtenidos se hizo un análisis de regresión lineal, hallando un $R = -0,5$ y un $R^2 = 0,46$; por lo cual concluye que el uso del Pilodyn es una estrategia poco eficiente para la estimación de la densidad en campo al nivel de árboles individuales.

INIA (2018) se realizó un análisis de regresión lineal entre la penetración con Pilodyn realizada en árbol en pie y la densidad básica obtenida por medio de muestras de barreno de Pressler. Se evaluaron un total de 9 árboles en cada una de las 3 plantaciones de Tornillo con edades de 35, 26 y 18 años, obteniéndose valores de densidad básica promedio 0,47 , 0,52 y $0,48 \text{ g/cm}^3$, y valores de penetración promedio 23,69, 24,92 y 22,52 mm respectivamente. Los coeficientes de determinación (R^2) encontrados fueron 0,67, 0,20 y 0,40 para cada una de las plantaciones de mayor a menor edad.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. ZONA DE ESTUDIO

La plantación de Tornillo se encuentra dentro de la Estación Experimental Alexander Von Humboldt del INIA, ubicada a 86 km de la ciudad de Pucallpa perteneciente al Distrito de Alexander Von Humboldt (Figura 7). La plantación de Capirona denominada “Bancos de Conservación y Huertos Semilleros de Bolaina blanca (*Guazuma crinita*), Capirona (*Calycophyllum spruceanum*) y Pijuayo (*Bactris gasipaes*)” pertenece al distrito de Irazola. Políticamente ambas plantaciones se encuentran en el la Provincia de Padre Abad, departamento de Ucayali – Perú (Figura 8).

2. LUGAR DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Tecnología de la Madera del Departamento Académico de Industrias Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), y en el Laboratorio Multipropósito ubicado en las instalaciones del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) Sede Central.

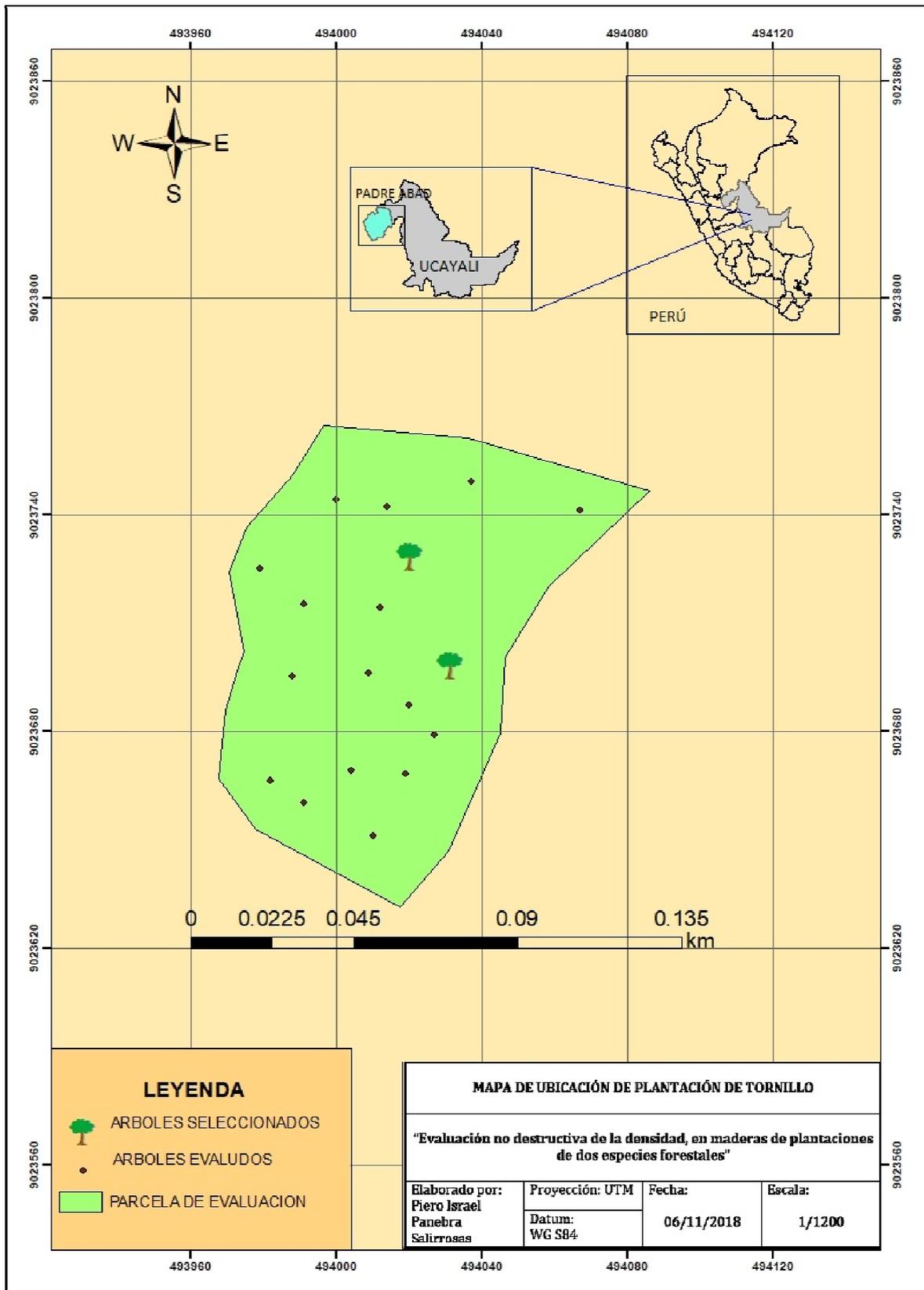


Figura 7: Mapa de ubicación de parcela de Tornillo

FUENTE: Elaboración propia

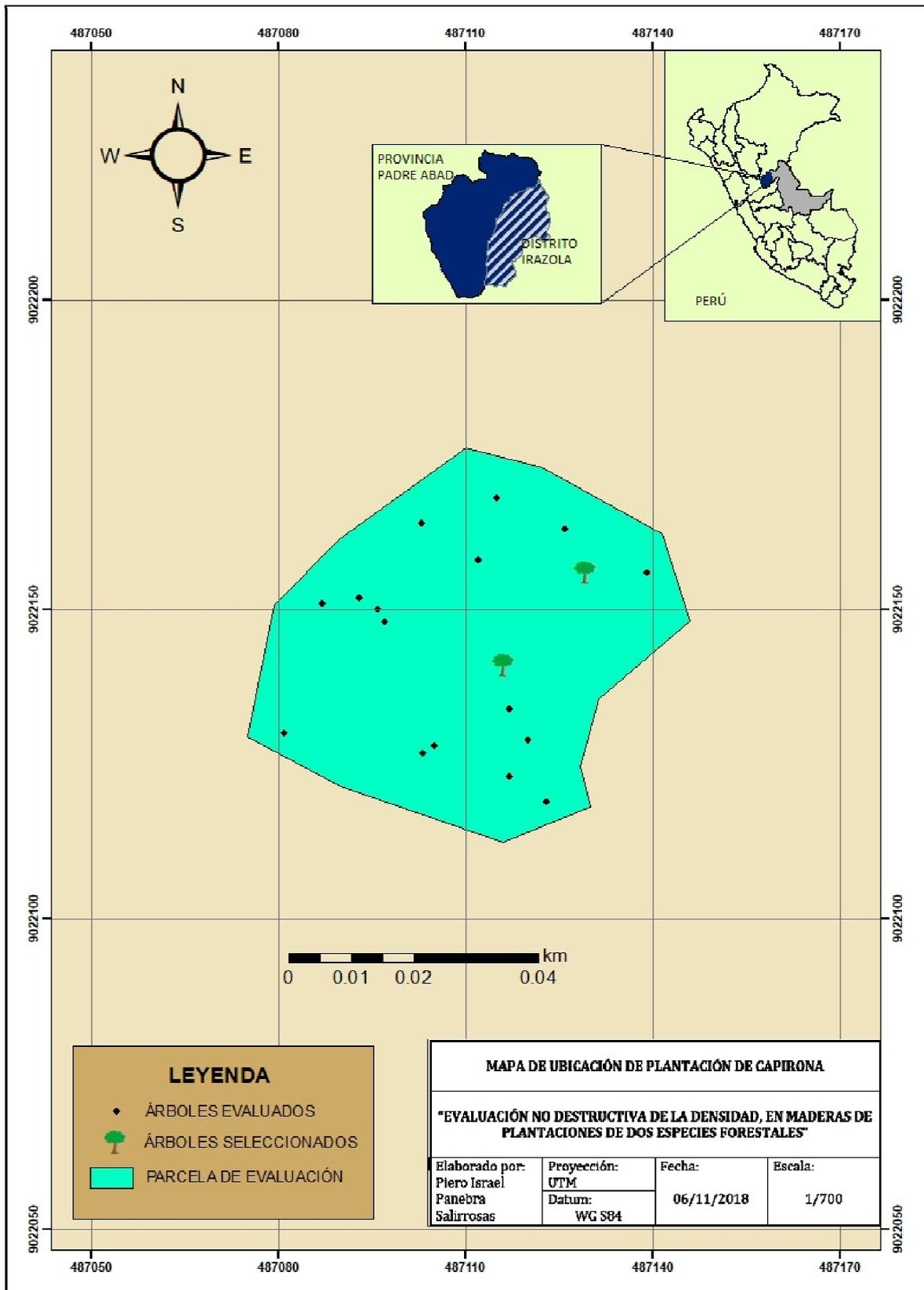


Figura 8: Mapa de ubicación de parcela de Capirona

FUENTE: Elaboración propia

3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1. ESPECIE

Las muestras de madera provienen de dos árboles de Tornillo *Cedrelinga cateniformis* procedentes de una plantación mixta junto con palmera Pijuayo (*Bactris sp.*) de 20 años de edad, y de dos árboles de Capirona *Calycophyllum spruceanum* de una plantación de 19 años de edad. Los datos ambas plantaciones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6: Datos de ambas plantaciones

<i>Especie</i>	Tornillo	Capirona
<i>Fecha de Instalación</i>	1997	1998
<i>Tipo de Plantación</i>	Campo abierto	Campo abierto
<i>Tratamientos silviculturales</i>	Ninguno	Ninguno
<i>Distanciamiento</i>	10 m x 10 m	2,5 m x 2,5 m
<i>Topografía</i>	Pendiente suave	Pendiente suave

La identificación de la especie se realizó en el Laboratorio de Anatomía de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), como se muestra en la constancia de identificación (Anexo1.)

3.2. MATERIALES

3.2.1. DE CAMPO

- Wincha de 30 m.
- Machetes
- Cinta diamétrica
- Cinta métrica
- Pintura para marcaje de árboles

3.2.2. DE LABORATORIO

- Lápices de cera

- Desecador de humedad
- Sílica gel
- Vaso de precipitado de 600 ml.
- Cuchillas
- Lupa 10x
- Plástico envolvente
- Artículos de escritorio
- Formatos para toma de datos

3.3. EQUIPOS

3.3.1. DE CAMPO

- Motosierra debidamente equipada
- Hipsómetro
- Brújula
- GPS
- TreeSonic Timer
- Pilodyn modelo 6J Forest, marca TerraGes

3.3.2. DE LABORATORIO

- Pilodyn modelo 6J Forest, marca TerraGes (Figura 9)
- Horno eléctrico a 103 ± 2 °C
- Vernier digital “Mitutoyo” de precisión 0,01 mm
- Balanza digital precisión 0,01g



Figura 9: Piodyn 6J Forest y accesorios

Fuente: INIA (2018)

3.4. METODOLOGÍA

3.4.1. COLECCIÓN Y SELECCIÓN DE MUESTRAS

Se seleccionaron 2 árboles de Tornillo y 2 de Capirona dentro de sus poblaciones respectivas como parte de un proyecto de investigación del INIA. Estos árboles fueron seleccionados de una evaluación de 18 árboles de cada población, a los cuales se les tomó datos dasométricos de altura comercial y diámetro altura de pecho (DAP), así como datos de evaluación con los equipos no destructivos TreeSonic Timer y Piodyn; la evaluación se muestra en la Figura 10 y 11. Se sacaron promedios de cada una de las categorías de datos tomados en campo para los 18 árboles, y se seleccionarán los árboles que más se acerquen a los promedios obtenidos para cada una de las categorías de datos.

Luego de ser evaluados, los árboles seleccionados fueron aprovechados para la posterior elaboración de probetas.



Figura 10: Evaluación de árboles de Tornillo



Figura 11: Evaluación de árboles de Capirona

3.4.2. ELABORACIÓN DE PROBETAS

La elaboración de probetas de la madera Tornillo, se realizó de la sección que comprende la base del árbol, que para este estudio se consideró hasta los 3 metros de altura. Por otro lado para la elaboración de probetas de la madera de Capirona, se utilizó madera proveniente de la base (hasta 3 metros de altura), de la parte intermedia (3 a 9 metros de altura) y de la parte apical (9 a 15 metros de altura). En la Figura 12, se muestra la disposición de los niveles longitudinales en árbol en pie.

Las secciones obtenidas para cada árbol, tienen un código donde se colocó la orientación de acuerdo a los cuatro puntos cardinales, así como el número de árbol para seguir un orden; esta orientación se obtuvo en el árbol en pie con el uso de una brújula.



Figura 12: Niveles longitudinales en árbol en pie

Se obtuvieron probetas para evaluación de distintas propiedades físico mecánicas, utilizándose para este estudio parte de las probetas de Flexión estática, siendo las del método primario las obtenidas para Tornillo y las del método secundario las obtenidas para Capirona. Para la elaboración de las probetas de Flexión estática se siguió la Norma Técnica Peruana respectiva, NTP 251.017 “Método para determinar la flexión estática”.

A partir de las probetas de Flexión estática se obtuvieron probetas más pequeñas cercanas a la falla producida luego del ensayo, siendo para Tornillo dos probetas de dimensiones 8 x 5 x 5 cm, y para Capirona una probeta de 10 x 2,5 x 2,5 cm. El total de probetas obtenidas se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Cantidad de probetas obtenidas para las especies en estudio

<i>Especie</i>	<i>Nivel Longitudinal</i>	<i>Cantidad de probetas</i>
Tornillo	B	187
	Total	187
Capirona	B	65
	I	79
	A	66
	Total	210

3.4.3. ACONDICIONAMIENTO DE MUESTRAS

La evaluación de la densidad en probetas, comenzó a una condición de humedad por encima del punto de saturación de las fibras (>30 por ciento de contenido de humedad), por lo que las probetas fueron saturadas por el método de inmersión en agua fría hasta llegar al contenido de humedad deseado.

Luego fueron evaluadas en condición de equilibrio, para lo cual estuvieron en un ambiente acondicionado a una Temperatura de 20 ± 2 °C y a una Humedad Relativa de 65 ± 5 por ciento, hasta alcanzar peso constante en dicho ambiente.

Para la condición anhidra, las probetas evaluadas en condición de equilibrio fueron secadas a estufa a una Temperatura de 103 ± 3 °C hasta alcanzar peso constante.

3.4.4. ENSAYOS DE LABORATORIO

El total de probetas obtenidas fueron ensayadas en las tres condiciones de humedad descritas en el punto anterior.

Para estas tres condiciones de humedad, las probetas fueron evaluadas con Pilodyn realizando una modificación de la metodología seguida por Íñiguez (2007), evaluando una cara Radial y una cara Tangencial. En la Figura 16 se muestra la evaluación con Pilodyn de una probeta de Tornillo en condición saturada.

En cada una de esas condiciones se realizó la determinación de la densidad por el método destructivo que se indica en la NTP 251.011 “Método para determina la densidad” y para determinar el contenido de humedad se siguió la NTP 251.010 “Métodos para determinar el contenido de humedad”.



Figura 13: Evaluación de probeta de Tornillo en condición saturada con Pilodyn

3.4.5. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Los datos obtenidos tanto con el método destructivo como con el no destructivo, fueron registrados y colocados en sus formatos correspondientes; luego de lo cual fueron procesados en el programa Microsoft Excel. Además se utilizaron los programas Statgraphics Centurion XVI, Past 3 y R - Studio, para realizar el análisis estadístico de los resultados.

Para las pruebas paramétricas realizadas (ANOVA, prueba de Tukey y Análisis de regresión lineal), se cumplieron los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad. De no cumplirse los supuestos se utilizó pruebas no paramétricas, las cuales fueron Kruskal - Wallis y Mann – Whitney con la corrección de Bonferroni haciendo uso de los valores de las medianas. Las pruebas se realizaron con un intervalo de confianza del 95 por ciento.

En el caso de Tornillo *Cedrelinga cateniformis* se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando un diseño completamente al azar (DCA), entre la penetración con Pilodyn en la cara Tangencial (Tg) y la penetración con Pilodyn en la cara Radial (Rd), para cada uno de los árboles, determinando así si existe o no diferencia significativa entre la penetración con Pilodyn según sección de corte longitudinal. Posteriormente se realizó una prueba de Kruskal – Wallis y de Mann-Whitney junto con la corrección de Bonferroni para determinar si existen diferencias significativas entre las penetraciones del Pilodyn con respecto a las tres condiciones de humedad en las que fueron evaluadas las probetas. Haciendo uso del Análisis de Regresión lineal en un diseño completamente al azar (DCA) o en un diseño en bloques completamente al azar si se utilizan más de dos variables, se determinó si existe o no una relación estadísticamente significativa ($P < 0,05$) entre la densidad y la penetración con Pilodyn, o entre las variables si se considera la condición de humedad; obteniéndose ecuaciones para los modelos lineales que describen las relaciones antes mencionada.

En Capirona *Calycophyllum spruceanum* se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando un diseño completamente al azar (DCA), entre la penetración con Pilodyn en la cara Tangencial (Tg) y la penetración con Pilodyn en la cara Radial (Rd), para cada uno de los niveles y condiciones de humedad en cada árbol, determinando así si existe o no diferencia significativa entre ambas penetraciones. Posteriormente se realizó otro ANOVA y prueba de Tukey para determinar si existe diferencia significativa entre la penetración del Pilodyn a nivel basal, medio y apical, para cada una de las condiciones de humedad. Posteriormente se realizó una prueba de Kruskal – Wallis y de Mann-Whitney junto con la

corrección de Bonferroni para determinar si existen diferencias significativas entre las penetraciones con Pilodyn en las tres condiciones de humedad para cada uno de los niveles evaluados. Haciendo uso del Análisis de Regresión lineal en un DCA o un diseño en Bloques completamente al azar si se utiliza más de dos variables, se determinó si existe una relación estadísticamente significativa ($P < 0,05$) entre la densidad y la penetración del Pilodyn, o entre las variables si se considera la condición de humedad y el nivel longitudinal; obteniéndose ecuaciones para los modelos lineales que describen la relación antes mencionada.

En ambas especies se utilizó el coeficiente de determinación corregido para realizar comparativas entre los modelos obtenidos en el análisis de regresión lineal, ya que este coeficiente es neutral frente a la introducción de variables adicionales (Martínez 2005)

En el uso de las ecuaciones de cada uno de los modelos obtenidos, las variables condición de humedad y nivel longitudinal se consideraron como factores asignándoles un valor; siendo para condición de humedad: 1 (saturada), 2 (equilibrio) y 3 (anhidro), y para nivel longitudinal: 1 (base), 2 (medio) y 3 (ápice).

En el análisis de regresión lineal de ambas especies para la densidad saturada, se hizo un ajuste al contenido de humedad promedio para esa condición de humedad haciendo uso de la densidad básica, en razón que la acción del Pilodyn es una acción mecánica que sobre el punto de saturación de las fibras no varía, por lo que predomina la menor o mayor presencia de material leñoso, cuyo mejor índice es la densidad básica.

Para el análisis de la densidad por métodos destructivos se utilizaron las mismas pruebas y criterios de evaluación estadístico, que en el análisis de la penetración del Pilodyn tanto para Tornillo como para Capirona.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. DENSIDAD

1.1. TORNILLO

Los resultados promedios y coeficiente de variación obtenidos para la humedad, densidad básica y densidad a la humedad indicada, se presentan en la Tabla 8. Estos valores son similares con los encontrados por Villa (2009) y Vega (2011), los que se presentan en la Tabla 9. Es importante precisar que las investigaciones se desarrollaron en el ámbito de la estación Experimental Alexander Von Humboldt – Ucayali. La densidad básica obtenida en esta investigación, resultó menor que la encontrada por Aróstegui (1982) para bosque natural según lo revisado en la Tabla 1.

Tabla 8: Valores de Densidad obtenidos para cada condición de humedad

<i>Condición de humedad</i>	<i>Contenido de humedad promedio (%)</i>	<i>Densidad básica (g/cm³)</i>	<i>Densidad Promedio (g/cm³)</i>	<i>CV (%) de la densidad</i>
Saturado	85,79	0,41	0,76	11
Equilibrio	14,36	0,41	0,49	7,8
Anhidro	-	0,41	0,46	7,97

Tabla 9: Densidades obtenidas para distintos autores

<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Promedio Obtenido</i>	<i>Villa (2009)¹</i>	<i>Vega (2011)¹</i>
Saturada	0,76	0,79	0,73
Equilibrio	0,49	0,52	-
Anhidra	0,46	0,47	0,44
Básica	0,41	0,43	0,38

¹/ valores ajustados a los contenidos de humedad de la presente investigación

1.2. CAPIRONA

Los resultados promedios y coeficiente de variación obtenidos para la humedad, densidad básica y densidad a la humedad indicada para los niveles longitudinales A, B y C, se presentan en la Tabla 10. Estos valores son mayores a los encontrados por Pantigoso (2009) en una plantación de 9 años; los valores se presentan en la Tabla 11. La densidad básica obtenida en esta investigación, resultó menor que la encontrada por Aróstegui (1974) y Meléndez (1999) para bosque natural según lo revisado en la Tabla 3.

Tabla 10: Valores de densidad obtenidos para cada condición de humedad y nivel longitudinal

<i>Condición de humedad</i>	<i>Nivel</i>	<i>Contenido de Humedad (%)</i>	<i>Densidad básica (g/cm³)</i>	<i>Densidad promedio (g/cm³)</i>	<i>CV (%) De la densidad</i>
Saturada	B	58,25	0,71	1,13	2,99
	I	59,27	0,69	1,11	4,15
	A	64,1	0,67	1,10	5,03
	Promedio	60,47	0,70	1,11	4,27
Equilibrio	B	14,75	0,71	0,87	5,29
	I	14,6	0,69	0,85	3,44
	A	14,49	0,67	0,81	3,95
	Promedio	14,61	0,70	0,84	5,19
Anhidro	B	-	0,71	0,84	5,79
	I	-	0,69	0,81	3,94
	A	-	0,67	0,77	4,32
	Promedio	-	0,70	0,81	5,63

Tabla 11: Densidades obtenidas para distintos autores

<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Promedio obtenido</i>	<i>Pantigoso (2009)¹</i>
Saturada	1,11	0,97
Equilibrio	0,84	0,74
Anhidra	0,81	0,69
Básica	0,7	0,61

¹/ valores ajustados para el contenido de humedad de la presente investigación

Se analizó la existencia de diferencia significativa entre las densidades obtenidas a diferentes niveles longitudinales para cada condición de humedad, para lo cual al no cumplirse los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad, se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal – Wallis, la cual dio como resultado que sí existe diferencia significativa entre las densidades a diferentes niveles longitudinales. Al encontrarse diferencia significativa se aplicó la prueba de Mann – Whitney con la corrección de Bonferroni, la cual compara los valores obtenidos entre cada uno de los niveles longitudinales. Los resultados se muestran en la Tabla 12, donde se aprecia que sí existen diferencias significativas entre cada uno de los niveles longitudinales para cada condición de humedad, excepto para el nivel I y A en la condición de humedad saturada.

Tabla 12: Prueba de Kruskal – Wallis para niveles longitudinales en cada condición de humedad

<i>Método tradicional</i>	<i>Condición de humedad</i>	<i>Prueba de Kruskal – Wallis</i>	<i>Nivel</i>	<i>Prueba de Mann – Whitney</i>
Densidad (g/cm ³) por método de inmersión	Saturada	S	B – I	S
			I – A	N.S
			A – B	S
	Equilibrio	S	B – I	S
			I – A	S
			A – B	S
	Anhidro	S	B – I	S
			I – A	S
			A – B	S

S: Significativo

N.S: No significativo

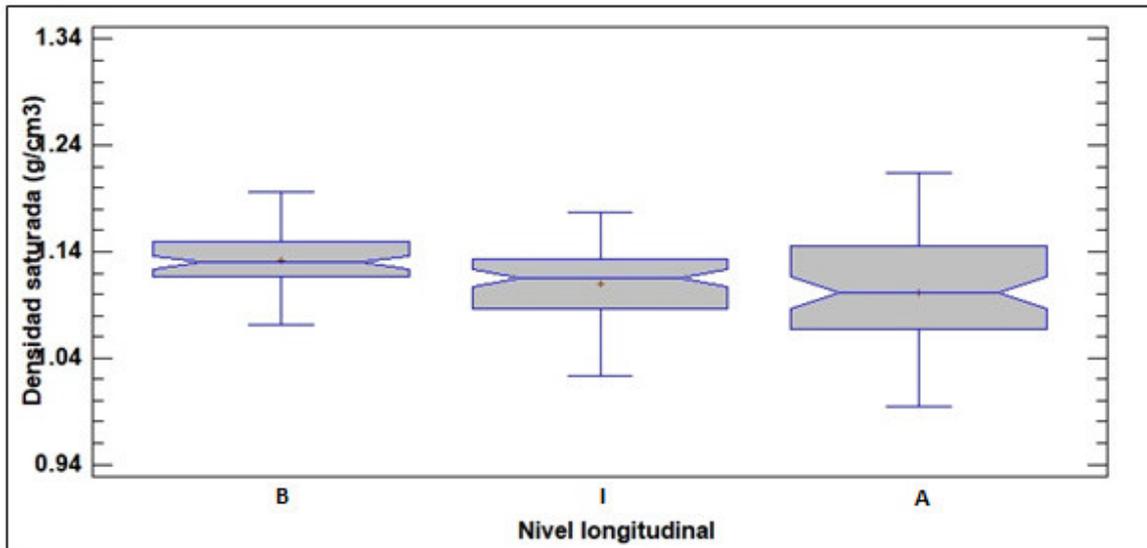


Figura 14: Diagrama de cajas con muesca en la mediana para densidad saturada a distintos niveles longitudinales

En la Figura 14, se muestra un diagrama de caja con muesca en la mediana para determinar si existe o no diferencias significativas, encontrándose que no existen diferencias significativas entre el nivel longitudinal I y A para la densidad saturada, ya que las muescas marcadas en la mediana para cada nivel longitudinal coinciden para ambos niveles.

Esta inexistencia de diferencia significativa se debe principalmente al contenido de humedad de cada nivel longitudinal, ya que el nivel I fue ensayado a un porcentaje de humedad menor en un 5 por ciento que el nivel A, lo cual hace que la densidad encontrada en A aumente significativamente al encontrarse por encima del PSF, y sea similar a la encontrada en I.

Lo mencionado en el párrafo anterior nos permite apreciar, que el contenido de humedad es un factor más influyente que el nivel longitudinal en la variación de la densidad.

Al evaluar la densidad básica, al igual que Pantigoso (2009) se obtuvieron diferencias significativas entre los niveles longitudinales, cuya densidad va disminuyendo hacia el ápice. Esta diferencia entre niveles longitudinales también se encontró en la densidad saturada, equilibrio y anhidra. Esto puede explicarse a que la base del árbol soporta los esfuerzos producto de factores externos como viento, produciendo el árbol madera más densa que sirva para ese fin.

En la Figura 15, se presenta un resumen de las densidades obtenidas tanto para Tornillo como para Capirona. Se puede apreciar en esta última que a distintos niveles y condiciones de humedad, ésta es un factor más influyente en la variabilidad de la densidad en comparación a los niveles longitudinales.

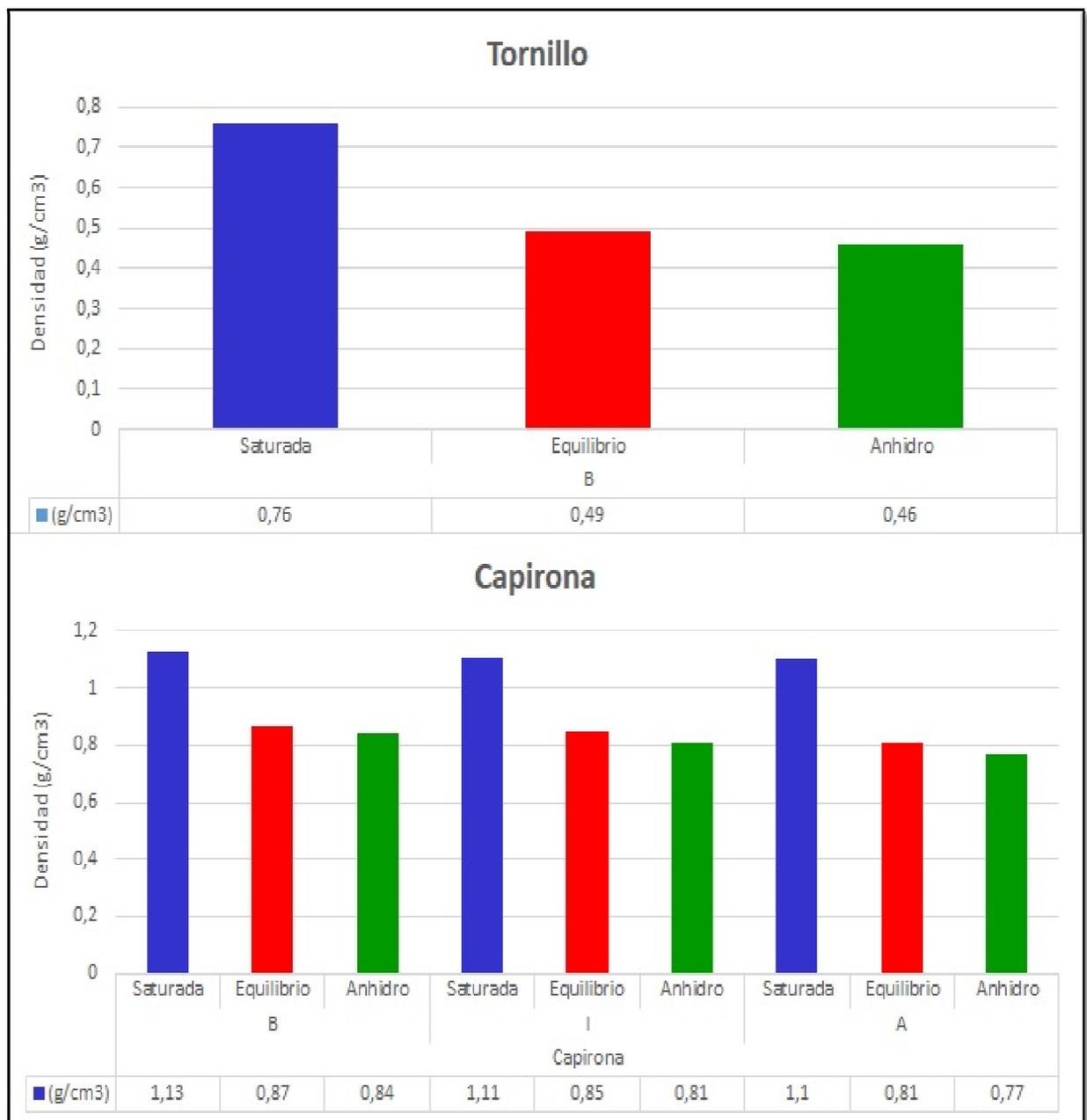


Figura 15: Densidad promedio para Tornillo y Capirona

B, I, A: Nivel basal, intermedio y apical

2. ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD CON PILODYN

2.1. TORNILLO

A nivel de base, el comportamiento de esta especie se ilustra en la Tabla 12. Se puede apreciar que la penetración en la cara tangencial es ligeramente mayor que la cara radial en las tres condiciones de humedad para cada uno de los árboles.

Sin embargo, al cumplirse los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) entre la penetración con Pilodyn en cara tangencial y radial, donde no se encontró ninguna certidumbre sobre la influencia de la orientación de la sección de corte en la profundidad de penetración, lo cual concuerda con lo encontrado por Íñiguez (2007). Esto se puede apreciar en la Tabla 13 ya que para cada árbol dentro de cada condición de humedad se podía o no encontrar diferencia significativa. Por lo mencionado, en los siguientes análisis se utilizó el promedio de la penetración tangencial y radial para cada condición de humedad.

Tabla 13: Valor promedio y coeficiente de variación de la profundidad de penetración, por orientación de corte y condición de humedad.

Árbol	Orientación de corte	Profundidad de Penetración					
		Saturada		Equilibrio		Anhidro	
		Valor promedio (mm)	CV (%)	Valor promedio (mm)	CV (%)	Valor promedio (mm)	CV (%)
1	Tangencial	22,36	15,45	13,97	17,41	14,75	16,35
	Radial	21,82	17,71	13,35	20,05	13,85	15,60
	Promedio	22,09	16,57	13,66	18,78	14,30	16,26
2	Tangencial	20,33	14,93	12,73	14,86	12,89	16,26
	Radial	19,19	17,80	11,92	19,53	12,39	18,11
	Promedio	19,76	16,57	12,32	17,49	12,64	17,26

Tabla 14: ANOVA entre penetración tangencial y radial para Tornillo

Árbol	Condición de humedad		
	Saturada	Equilibrio	Anhidra
1	N.S	N.S	S
2	S	S	N.S

S: Significativa

N.S: No significativa

Respecto a la penetración del Pilodyn a distintos contenidos de humedad, el comportamiento de esta especie se presenta en la Tabla 15. Se puede apreciar en dicha Tabla que el valor promedio de penetración del Pilodyn es mayor en la condición de humedad saturado, seguido de la condición de humedad anhidro y equilibrio respectivamente.

Al no cumplir los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad, se realizaron las prueba no paramétricas de Kruskal – Wallis y la de Mann - Whitney con la corrección de Bonferroni, donde se encontró diferencias significativas entre todas las condiciones de humedad excepto entre la condición de humedad equilibrio y anhidro, lo cual se muestran en la Tabla 16.

Tabla 15: Valores promedio para penetración del Pilodyn en distintas condiciones de humedad

<i>Condición de humedad</i>	<i>Valor Promedio (mm)</i>	<i>CV (%)</i>
Saturado	20,52	16,09
Equilibrio	12,76	15,62
Anhidro	13,18	15,74

Tabla 16: Prueba de Kruskal Wallis para condiciones de humedad

<i>Prueba no destructiva</i>	<i>Prueba Kruskal - Wallis</i>	<i>Condición de humedad</i>	<i>Prueba Mann - Whitney</i>
Penetración promedio del Pilodyn (mm)	S	Saturado - Equilibrio	S
		Equilibrio - Anhidro	N.S
		Anhidro - Saturado	S

S: Significativa

N.S: No significativa

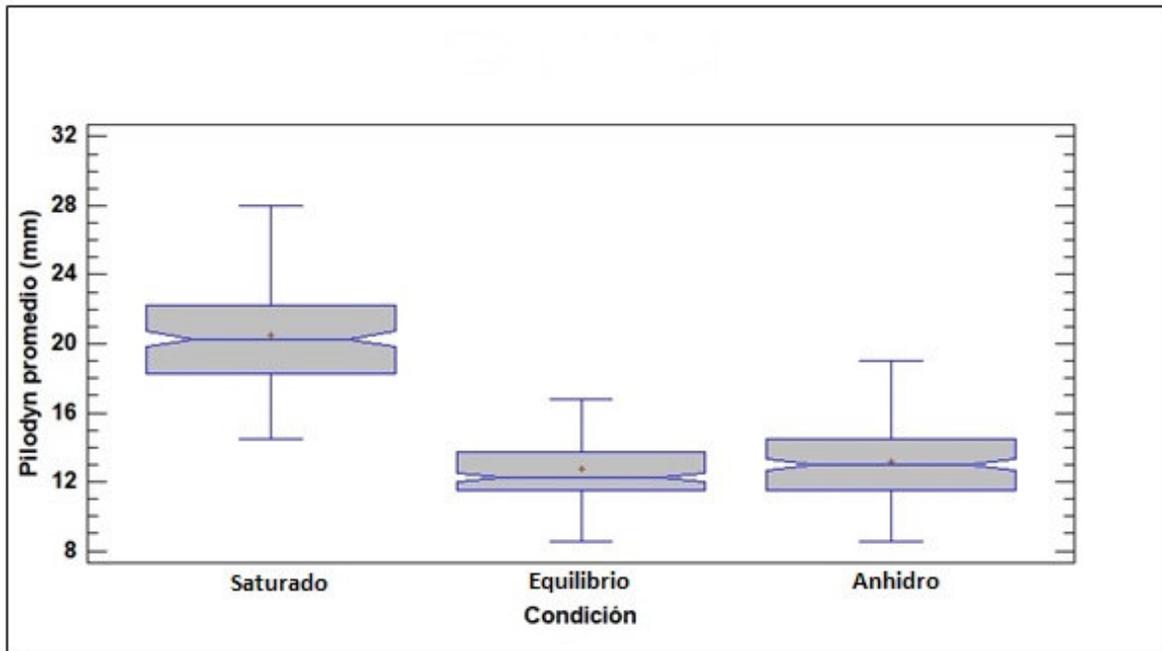


Figura 16: Diagrama de cajas con muesca en la mediana para densidad promedio en tres condiciones de humedad

Esta diferencia, que se puede apreciar mejor en la Figura 16, se explica debido a que la penetración con Pilodyn es realizada al ejercer una fuerza constante, dada por un resorte, para disparar una varilla de metal hacia la madera; la profundidad de la penetración va a depender de la resistencia del material (Bobadilla *et al.* 2007). La madera es un material que a medida que va perdiendo humedad, la resistencia mecánica permanece constante hasta llegar al PSF (CH=30%), la cual por debajo de ese contenido de humedad va en aumento de manera progresiva (De la Mata 2011). Lo mencionado por este último no se cumple, ya que la diferencia en profundidad de penetración entre la condición saturada y las otras dos condiciones de humedad es drástica y no progresiva, no presentando diferencia significativa entre la condición de humedad de equilibrio y la condición anhidra. Estos resultados se deben a que la madera de Tornillo evaluada fue muy heterogénea, característica de las maderas latifoliadas (León y Espinoza de Pernía 2001), inclusive se encontró una penetración promedio ligeramente superior para la condición anhidra en comparación con la condición en equilibrio. Al ser el Pilodyn un instrumento de acción puntual, el comportamiento de los resultados estaría dado por algunos de los componentes anatómicos del Tornillo como el gran diámetro y poca cantidad de los poros, la presencia de gomas y floema incluido (Silva 2005).

2.1.1. RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD Y PENETRACIÓN

El análisis de regresión lineal dio como resultado ecuaciones que corresponden a un modelo estadístico donde la densidad es la variable respuesta e intervienen otras variables, siendo para el Tornillo la penetración del Pilodyn y la condición de humedad. En la Tabla 16 se ilustra los resultados para la regresión lineal simple y regresión lineal múltiple. Para todos los modelos mostrados se encontró una relación estadísticamente significativa entre las variables utilizadas para cada modelo.

Tabla 17: Ecuaciones obtenidas para modelos de regresión lineal para densidad

<i>Especie</i>	<i>Variables</i>	<i>Coefficiente de Correlación (R)</i>	<i>Coefficiente de determinación (R²)</i>	<i>R² corregido</i>	<i>Ecuación del modelo lineal</i>
Tornillo	DS y PS	- 0,76	0,578	0,576	DS = 1,05545 - 0,01425 PS (1)
	D *, P* y CH*	-	0,651	0,649	D = 0,7368 - 0,0138044 P - 0,0326402 CH (2)
	DE y PE	- 0,711	0,505	0,503	DE = 0,671372 - 0,01379 PE (3)
	DA y PA	- 0,787	0,620	0,618	DA = 0,639028 - 0,0138154 PA (4)

*: Para condición de equilibrio o anhidra

(): Número de ecuación para el modelo lineal

Para la Tabla 17: DS = Densidad saturada (g/cm³), PS = Pilodyn saturado (mm), D = Densidad (g/cm³), P = Pilodyn (mm), CH= Condición de humedad, DE = Densidad equilibrio (g/cm³), PE = Pilodyn equilibrio (g/cm³), DA = Densidad anhidro (g/cm³) y PA = Pilodyn anhidro (g/cm³).

Respecto al análisis de regresión lineal simple, el modelo lineal 1 explica la variabilidad de la densidad en condición saturada en un 57,8 por ciento (R²). Al presentar un R de -0,76, se indica una relación inversa y moderada a fuerte entre las variables. Para la determinación de este modelo se ajustó la densidad saturada al contenido de humedad promedio para todas las probetas ensayadas en dicha condición, haciendo uso de la densidad básica, con lo cual se redujo la influencia de la humedad unificando el valor del contenido de humedad.

Al realizar este ajuste tanto el coeficiente de correlación como el de determinación aumentaron y se mejoró el modelo de manera significativa; se pasó de tener un R de 0,19 a

uno de $-0,76$, y de tener un R^2 corregido de $3,11$ por ciento a uno de $57,6$ por ciento. En la Figura 17 se muestra el modelo antes del ajuste, y en la Figura 18 el modelo después del ajuste de la densidad saturada donde se puede apreciar lo antes mencionado.

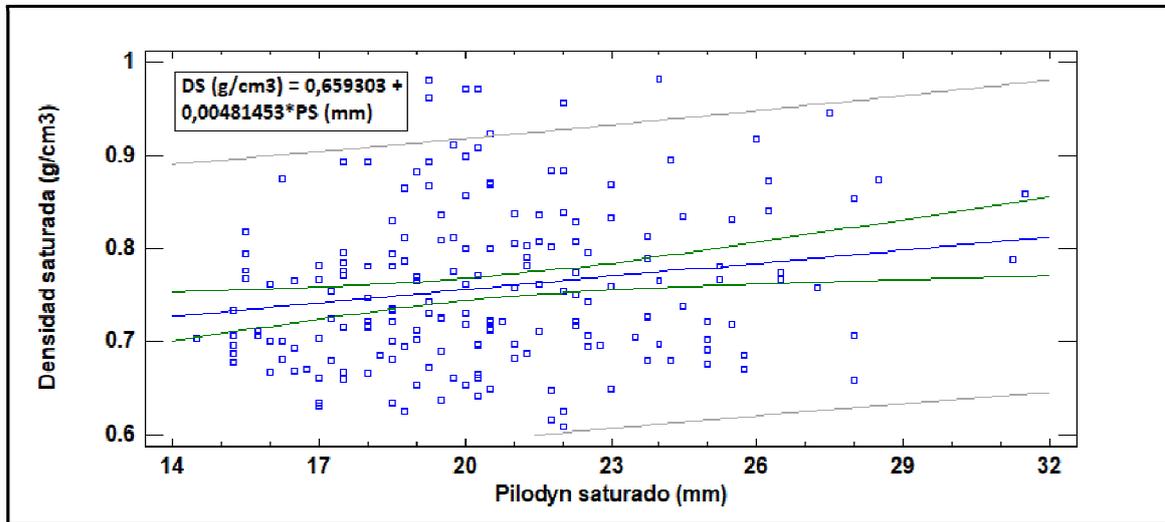


Figura 17: Modelo para la densidad saturada antes del ajuste y penetración con Pilodyn en condición saturada

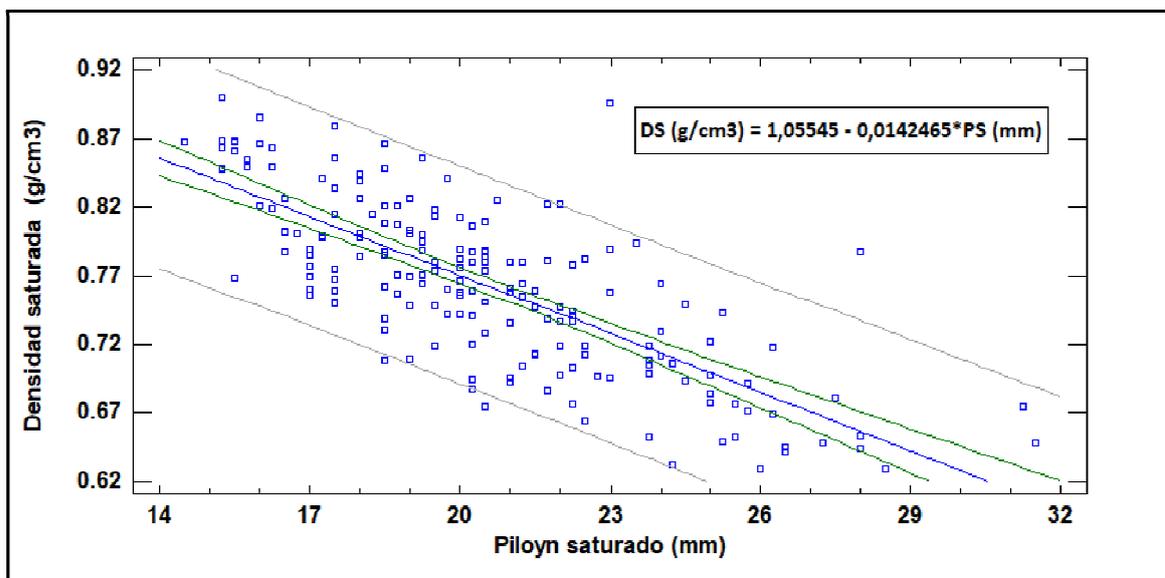


Figura 18: Modelo 1 para densidad saturada y penetración con Pilodyn en condición saturada

El modelo lineal 3, para describir la relación entre densidad y penetración con Pilodyn en condición de equilibrio tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 50,5 por ciento, lo cual indica que el modelo lineal explica el 50,5 por ciento de la variabilidad de la densidad. La relación entre las variables es moderadamente fuerte e inversa debido a un coeficiente de correlación (R) de -0,71. La Figura 19 nos muestra el modelo.

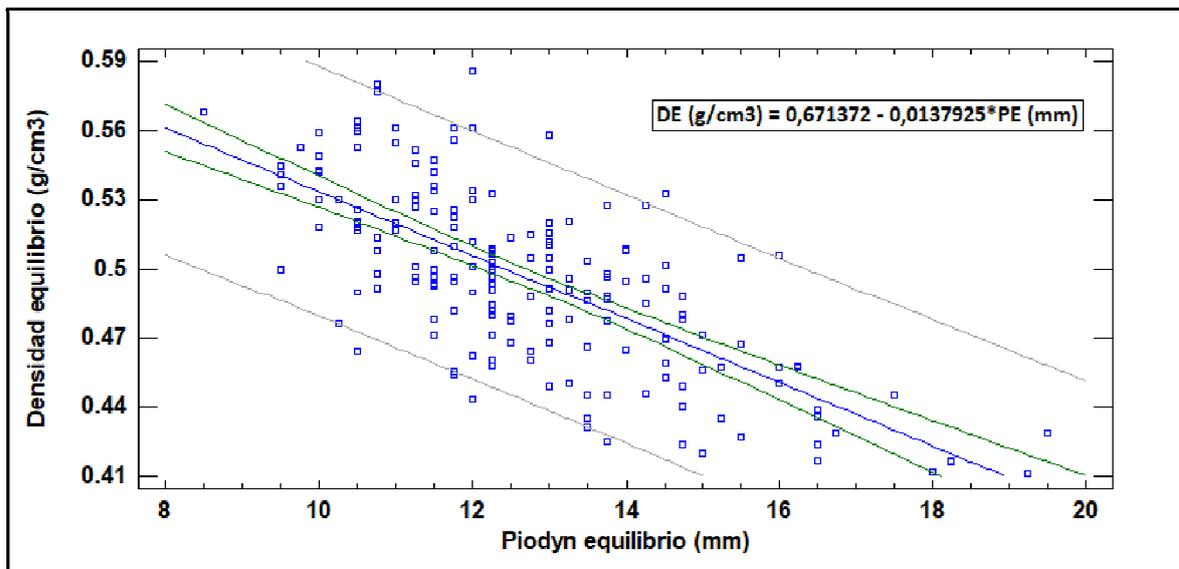


Figura 19: Modelo 3 para densidad y penetración con Pilodyn en condición de equilibrio

El modelo lineal 4, para describir la relación entre densidad y penetración con Pilodyn en condición anhidra tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 44,2 por ciento, lo cual indica que el modelo lineal explica el 44,2 por ciento de la variabilidad de la densidad. La relación entre las variables es moderadamente fuerte e inversa debido a un coeficiente de correlación (R) de -0,787. La Figura 20 nos muestra el modelo lineal.

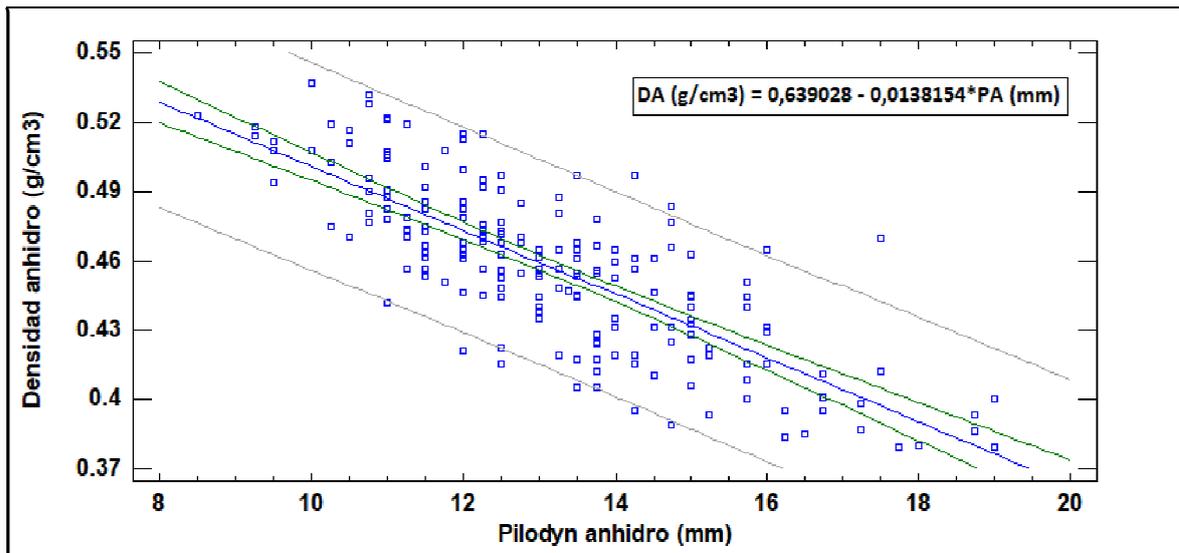


Figura 20: Modelo 4 para densidad y penetración con Pilodyn en condición anhidra

Los modelos 1, 3 y 4, muestran unos resultados esperados, ya que se obtuvo mayor R^2 corregido en condición anhidra para el modelo 4, luego en condición saturada para el modelo 1 y finalmente en condición de equilibrio para el modelo 3. Esto se debe a que tanto en la condición anhidra como en la condición saturada con ajuste en la densidad, se ha logrado eliminar (condición anhidra) y disminuir (condición saturada con ajuste en la densidad) el efecto de la humedad, algo que no sucede en la condición de equilibrio.

En relación al análisis de regresión múltiple, considerando como variable adicional la condición de humedad (equilibrio o anhidro), se obtuvo un modelo lineal 2 con un coeficiente de determinación (R^2) de 65,13 por ciento. Este modelo lineal explica mejor la variabilidad de la densidad que los modelos anteriormente analizados, esto debido al aumento de las variables dentro del modelo.

Dentro de este modelo no se incluyó la densidad ni penetración con Pilodyn en condición saturada, debido a que su variabilidad influye en el no cumplimiento de los supuestos estadísticos para dicho modelo.

2.2. CAPIRONA

El comportamiento a tres niveles longitudinales, se muestra en la Tabla 18. Se puede apreciar que la penetración en la cara tangencial es ligeramente mayor que en la cara radial en las tres condiciones de humedad y en los tres niveles longitudinales para cada árbol, excepto para el nivel medio y la condición anhidra del árbol 14.

Sin embargo, al cumplirse los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad, se realizó un ANOVA entre la penetración en cara tangencial y radial, en cada condición de humedad para cada nivel longitudinal; en el cual no se encontró ninguna certidumbre sobre la influencia de la orientación de la sección de corte en la profundidad de penetración, ya que para cada árbol dentro de cada condición de humedad y nivel, se podía o no encontrar diferencias significativas

Tabla 18: Valor promedio y coeficiente de variación de la profundidad de penetración , por orientación , nivel y condición de humedad

Árbol	Nivel	Cara	Profundidad de Penetración					
			Saturada		Equilibrio		Anhidro	
			Valor promedio (mm)	CV (%)	Valor promedio (mm)	CV (%)	Valor promedio (mm)	CV (%)
14	Basal	Tangencial	8,89	12,89	5,9	11,86	3,63	27,55
		Radial	8,29	14,59	5,63	15,03	3,34	22
		Promedio	8,59	14,05	5,77	13,57	3,48	25,32
21		Tangencial	8,21	10,08	5,49	14,1	3,32	24,53
		Radial	7,62	13,33	5,22	14,57	2,97	30,99
		Promedio	7,91	12,2	5,35	14,44	3,15	28
14	Medio	Tangencial	9,38	10,76	5,75	13,22	3,75	18,53
		Radial	8,61	10,9	5,59	16,48	3,79	21,17
		Promedio	8,99	11,6	5,67	14,86	3,77	19,78
21		Tangencial	9,12	7,53	5,93	10,6	3,6	25,67
		Radial	8,57	8,9	5,49	17,46	3,62	19,71
		Promedio	8,85	8,73	5,71	14,63	3,61	22,73
14	Apical	Tangencial	10,67	8,16	6,21	12,91	4,61	17,68
		Radial	10,1	11,12	6,02	12,97	4,5	17,78
		Promedio	10,38	9,98	6,12	12,91	4,56	17,6
21		Tangencial	9,14	8,49	5,85	12,72	3,7	21,16
		Radial	8,69	10,48	5,48	14,17	3,68	22,12
		Promedio	8,91	9,77	5,66	13,75	3,69	21,51

Lo mencionado en el párrafo anterior se puede apreciar en la Tabla 19 ya que para cada árbol dentro de cada condición de humedad y nivel longitudinal se podía o no encontrar diferencia significativa. Sin embargo si se analiza por condiciones de humedad, se tiene menor cantidad de diferencias significativas en la condición de equilibrio, y en la condición anhidra no se presentan diferencias significativas entre la penetración tangencial y radial en ambos árboles y niveles; lo cual nos da un indicador de que la variabilidad de la penetración está relacionada al mayor contenido de humedad. Por lo mencionado, en los siguientes análisis se utilizó el promedio de la penetración tangencial y radial para cada condición de humedad y nivel longitudinal, y no se realizó diferenciación entre árboles.

Tabla 19: ANOVA entre penetración tangencial y radial para Capirona

<i>Árbol</i>	<i>Nivel</i>	<i>Saturado</i>	<i>Equilibrio</i>	<i>Anhidro</i>
14	Basal	N.S	N.S	N.S
	Intermedio	S	N.S	N.S
	Apical	S	N.S	N.S
21	Basal	S	N.S	N.S
	Intermedio	S	S	N.S
	Apical	S	S	N.S

S: Significativa

N.S: No significativa

Con respecto a la penetración del Pilodyn a distintos niveles longitudinales, el comportamiento de esta especie se presenta en la Tabla 20, observándose valores menores en nivel basal y mayores en nivel apical para cada condición de humedad. Para este análisis se considera B (basal), I (Intermedio) y A (apical). En esta tabla se puede apreciar que los valores de coeficiente de variación son mayores en la condición de humedad anhidro dentro de cada nivel longitudinal; esto se debe a la precisión del equipo la cual es de 0,5 milímetros, ya que cuando los valores de penetración son pequeños menores a 5 milímetros, la eficiencia en la determinación de la penetración disminuye y el error aumenta.

Tabla 20: Valor promedio y coeficiente de variación para penetración por niveles para cada condición de humedad

<i>Condición de humedad</i>	<i>Nivel longitudinal</i>	<i>Valor Promedio (mm)</i>	<i>CV (%)</i>
Saturada	B	8,23	12,85
	I	8,92	9
	A	9,49	11,39
	Promedio	8,89	12,3
Equilibrio	B	5,55	11,98
	I	5,69	12,61
	A	5,84	11,72
	Promedio	5,69	12,25
Anhidro	B	3,31	23,97
	I	3,69	18,05
	A	4,03	19,51
	Promedio	3,68	21,62

Tabla 21: ANOVA y prueba de Tukey para penetración a diferentes niveles longitudinales en cada condición de humedad

<i>Prueba no destructiva</i>	<i>Condición de humedad</i>	<i>ANOVA</i>	<i>Nivel</i>	<i>Prueba de Tukey</i>
Penetración promedio con Pilodyn (mm)	Saturada	S	B - I	S
			I - A	S
			A - B	S
	Equilibrio	N.S	B - I	N.S
			I - A	N.S
			A - B	N.S
	Anhidro	S	B - I	S
			I - A	S
			A - B	S

S: Significativo

N.S: No significativo

Al cumplirse los supuesto de homogeneidad de varianzas y normalidad, se realizó un ANOVA junto con la prueba de Tukey, lo cual dio como resultado que las diferencias que existen son significativas para los niveles longitudinales en la condición de humedad saturada y anhidra; para la condición de humedad de equilibrio estas diferencias no son significativas (Tabla 21). Este comportamiento se explica debido a que la penetración del Pilodyn es una acción mecánica por lo tanto varía por debajo del PSF, lo cual hace a la condición de equilibrio la más susceptible a las pequeñas variaciones de humedad.

En relación a la penetración del Pilodyn a distintas condiciones de humedad, como se muestra en la Tabla 22, debido a que no se cumplieron los supuestos, se realizaron las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y de Mann Whitney con la corrección de Bonferroni, obteniéndose como resultado que entre todas las condiciones de humedad para cada nivel longitudinal se presentan diferencias significativas. En la Figura 21, se muestra a manera de ejemplo el comportamiento de esas diferencias en el nivel apical, dado que en los otros niveles longitudinales el comportamiento es similar.

Tabla 22: Prueba de Kruskal- Wallis para condiciones de humedad, en cada nivel longitudinal.

<i>Prueba no destructiva</i>	<i>Nivel Longitudinal</i>	<i>Prueba de Kruskal-Wallis</i>	<i>Condición de humedad</i>	<i>Prueba de Mann - Whitney</i>
Penetración promedio del Pilodyn (mm)	Basal	S	Saturado - Equilibrio	S
			Equilibrio – Anhidro	S
			Anhidro - Saturado	S
	Medio	S	Saturado - Equilibrio	S
			Equilibrio – Anhidro	S
			Anhidro - Saturado	S
	Apical	S	Saturado - Equilibrio	S
			Equilibrio – Anhidro	S
			Anhidro - Saturado	S

S: Significativo

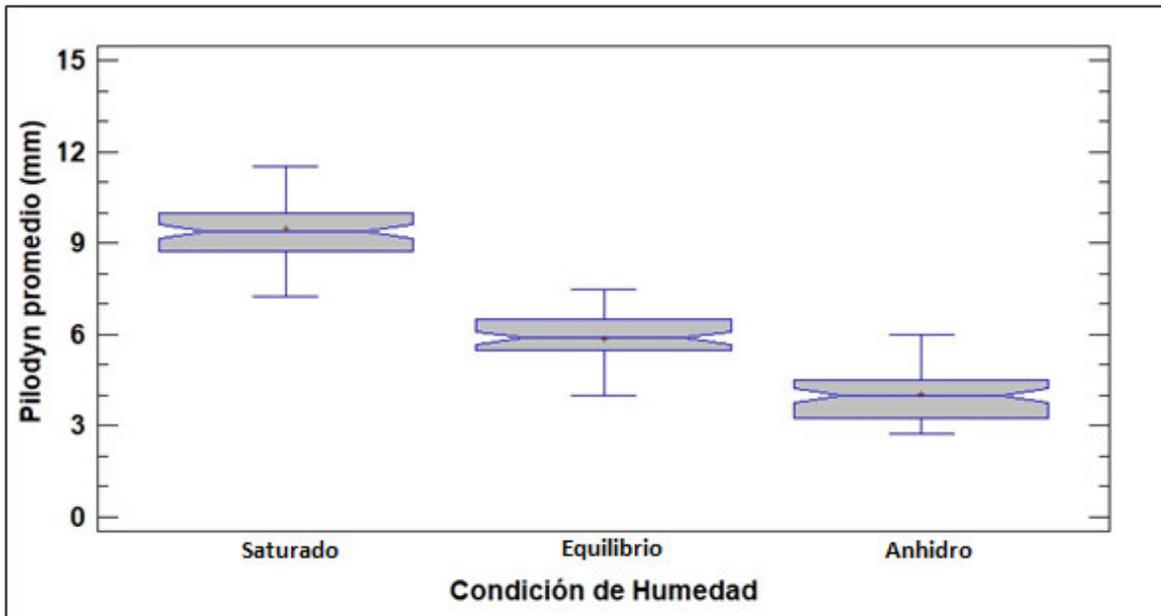


Figura 21: Diagrama de cajas con muesca en la mediana para Pilodyn promedio en el nivel apical a distintas condiciones de humedad

Estas diferencias significativas entre condiciones de humedad se dan debido a que, por debajo del punto de saturación de las fibras (PSF), la resistencia mecánica de la madera aumenta de manera progresiva con el descenso de humedad (De la Mata 2011).

En la Figura 22, se muestra un resumen de la penetración promedio obtenida con Pilodyn para Capirona, a diferentes condiciones de humedad y niveles longitudinales. Como se puede apreciar, existe una diferencia entre las penetraciones a nivel longitudinal para cada condición de humedad. Esta diferencia es mayor si se comparan entre condiciones de humedad para cada nivel longitudinal, siendo la diferencia aún mayor si se comparan con la condición de humedad saturada. Por lo mencionado se considera la condición de humedad un factor más influyente en la variabilidad de la penetración con Pilodyn en comparación al factor nivel longitudinal.

Al comparar el comportamiento las penetraciones tanto para Tornillo como para Capirona, se aprecia que la penetración es menor para Capirona en todas las condiciones de humedad y niveles longitudinales. Esto se debe a la relación inversa que existe entre la penetración con Pilodyn y la densidad, ya que al ser la Capirona una madera de mayor densidad que el Tornillo los valores de penetración son menores.

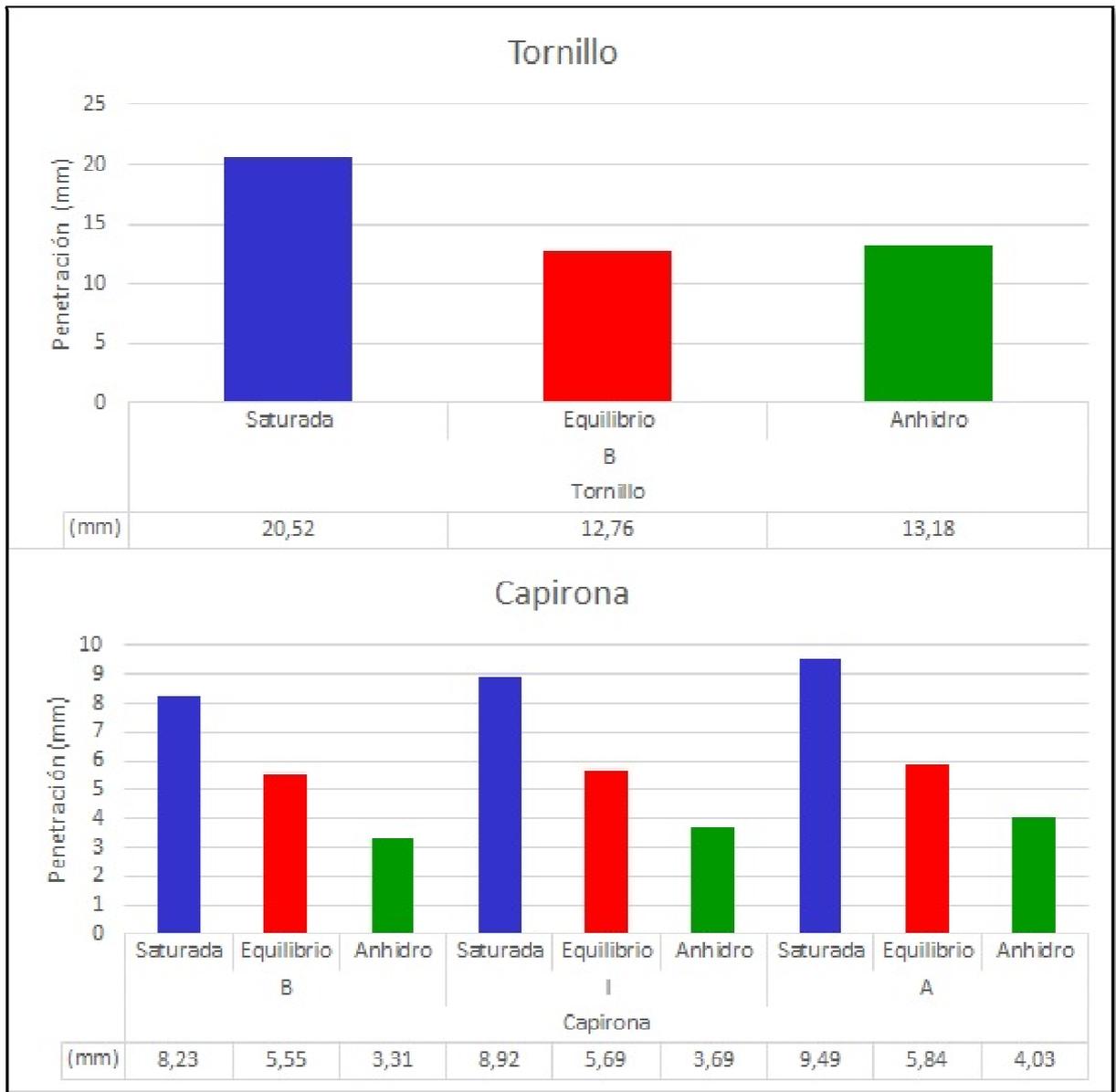


Figura 22: Resumen penetración promedio con Pilodyn para Tornillo y Capirona

B, I, A: Nivel longitudinal basal, intermedio y apical

2.2.1. RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD Y PENETRACIÓN

El análisis de regresión lineal dio como resultado ecuaciones que corresponden a un modelo estadístico donde la densidad es la variable respuesta e intervienen otras variables, siendo para la Capirona la penetración del Pilodyn, la condición de humedad y los niveles longitudinales. En la Tabla 23 se ilustra los resultados para la regresión lineal simple y regresión lineal múltiple. Para todos los modelos mostrados se encontró una relación estadísticamente significativa entre las variables utilizadas para cada modelo. Los rangos de contenido de humedad para cada condición de humedad y de cada nivel longitudinal se muestran en el Anexo 3.

Respecto a la regresión lineal simple, el modelo 8 explica la variabilidad de la densidad en condición saturada en un 58,72 por ciento (R^2). Al presentar un R de -0,77, se indica una relación inversa y moderada a fuerte entre las variables. Para la determinación de este modelo se ajustó la densidad saturada al contenido de humedad promedio para todas las probetas ensayadas en dicha condición, haciendo uso de la densidad básica.

Al realizar este ajuste tanto el coeficiente de correlación como el de determinación aumentaron y se mejoró el modelo de manera significativa; se pasó de tener un R de -0,59 a uno de -0,77, y de tener un R^2 corregido de 35,47 por ciento a uno de 58,52 por ciento. En la Figura 23 se muestra el modelo después del ajuste de la densidad saturada.

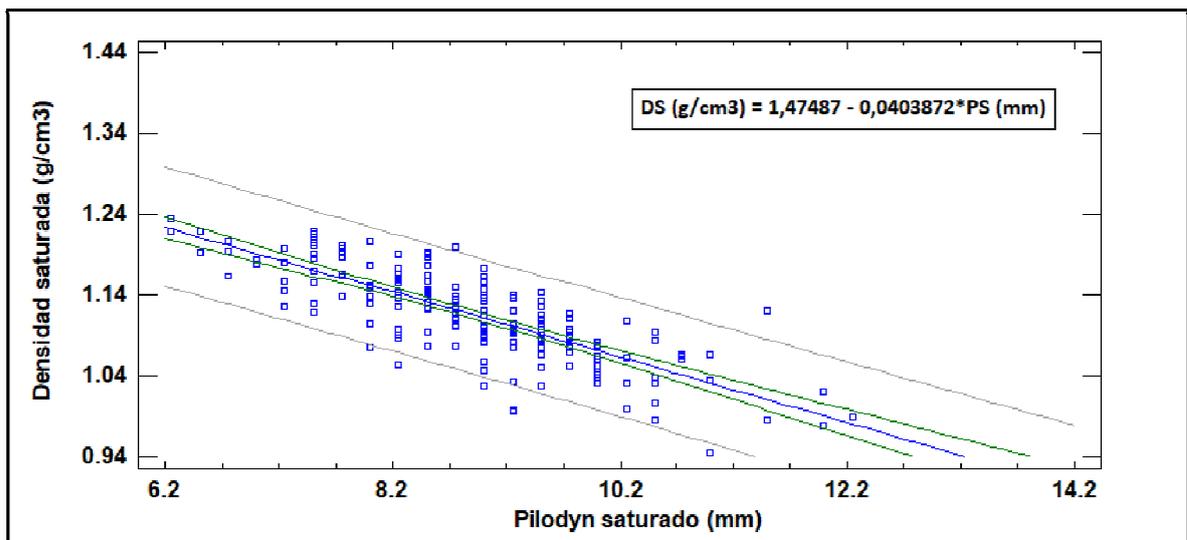


Figura 23: Modelo 8 para densidad saturada y penetración con Pilodyn en condición saturada

Tabla 23: Ecuaciones obtenidas para modelos de regresión lineal para densidad

<i>Especie</i>	<i>Variables</i>	<i>Coefficiente de Correlación (R)</i>	<i>Coefficiente de determinación (R²)</i>	<i>R² corregido</i>	<i>Ecuación del modelo lineal</i>
Capirona	D**, P**, CH** y N**	-	0,777	0,776	D = 1,31324 - 0,00296666 P - 0,162063 CH - 0,0250649 N (5)
	D**, P** y N**	-	0,658	0,657	D = 0,705067 + 0,0503523 P - 0,0452457 N (6)
	D**, P** y CH**	-	0,761	0,759	D = 1,34216 - 0,0097579 P - 0,18032 CH (7)
	DS y PS	- 0,766	0,587	0,585	DS = 1,47487 – 0,0403872 PS (8)
	DE y PE	- 0,536	0,287	0,284	DE = 1,03429 – 0,0336151 PE (9)
	DA y PA	- 0,665	0,442	0,440	DA = 0,945047 – 0,0379642 PA (10)

** : Para cualquiera de las tres condiciones de humedad

(): Número de ecuación para el modelo lineal

Para la Tabla 23: DS = Densidad saturada (g/cm³), PS = Pilodyn saturado (mm), D = Densidad (g/cm³), P = Pilodyn (mm), CH= Condición de humedad, DE = Densidad equilibrio (g/cm³), PE = Pilodyn equilibrio (g/cm³), DA = Densidad anhidro (g/cm³), PA = Pilodyn anhidro (g/cm³) y N = Nivel longitudinal.

El modelo lineal 9, para describir la relación entre densidad y penetración con Pilodyn en condición de equilibrio tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 28,7 por ciento, lo cual indica que el modelo lineal explica el 28,7 por ciento de la variabilidad de la densidad. La relación entre las variables es moderada e inversa debido a un coeficiente de correlación (R) de -0,54. La Figura 24 nos muestra el modelo lineal.

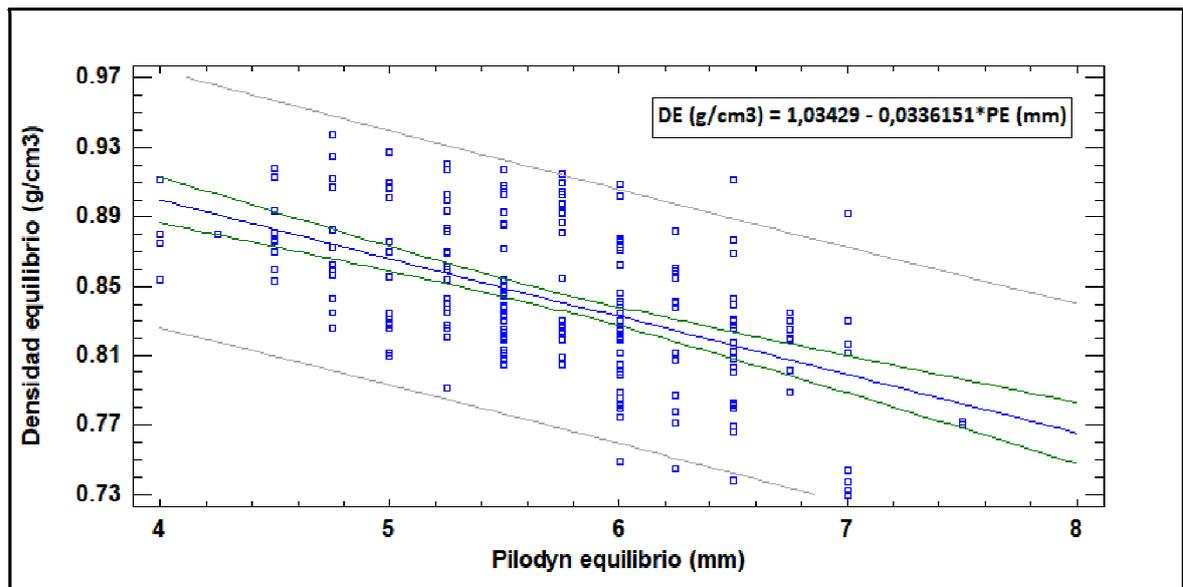


Figura 24: Modelo 9 para densidad en equilibrio y penetración del Pilodyn en condición de equilibrio

El modelo lineal 10, para describir la relación entre densidad y penetración con Pilodyn en condición anhidra tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 62 por ciento, lo cual indica que el modelo lineal explica el 62 por ciento de la variabilidad de la densidad. La relación entre las variables es moderadamente fuerte e inversa debido a un coeficiente de correlación (R) de -0,665. La Figura 25 nos muestra el modelo lineal.

Los modelos 8, 9 y 10, muestran unos resultados que difieren de los esperados, ya que se esperaba obtener un R^2 corregido mayor en la condición anhidra, luego en la condición saturada, y menor en la condición de equilibrio. Si bien se muestra un R^2 corregido menor en la condición de equilibrio en el modelo 9, se obtuvo un R^2 corregido mayor en condición saturada para el modelo 8 que en la condición anhidra para el modelo 10.

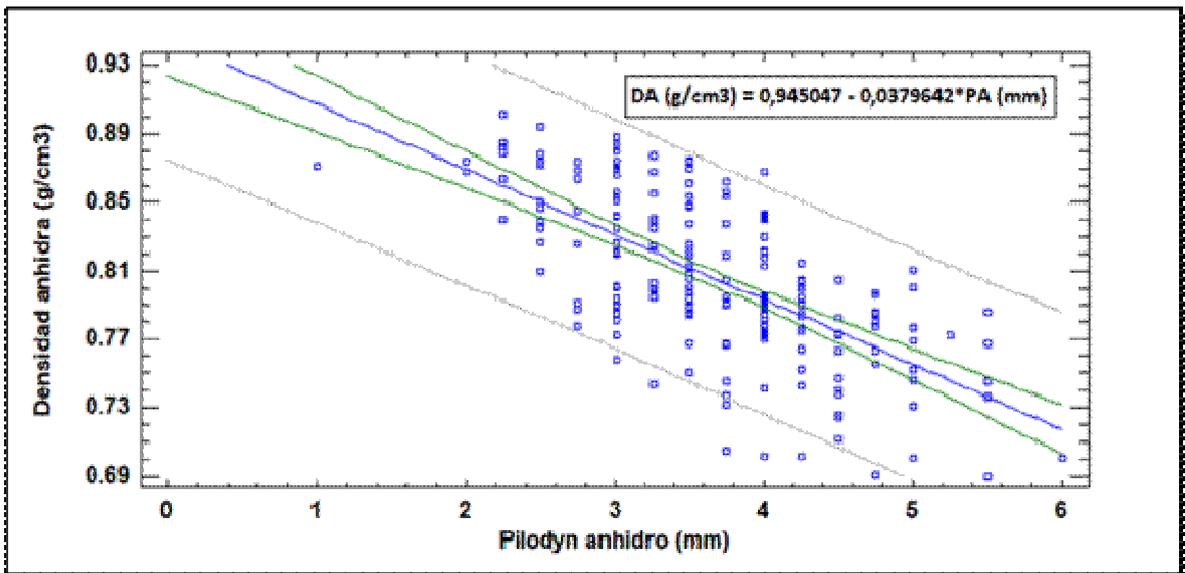


Figura 25: Modelo 10 para densidad anhidra y penetración con Pilodyn en condición anhidra

Este comportamiento puede deberse a la variabilidad de la madera Capirona, ya que tanto en el estudio realizado por Acevedo y Kikata (2004) como en el de Bustamante (2017), se encontraron rangos amplios para los valores diámetro y longitud de vasos, altura de los radios y longitud de fibras.

En relación a la regresión lineal múltiple, se realizaron análisis adicionando la variable condición de humedad y/o la variable nivel longitudinal según sea el caso.

En modelo lineal 5 se incluyen las variables condición de humedad y nivel longitudinal, obteniéndose un R^2 igual a 77,74 por ciento; esto quiere decir que el 77,74 por ciento de la variabilidad de la densidad es explicada por este modelo.

Si bien este modelo lineal mostrado explica en un alto porcentaje la variabilidad de la densidad, por lo que se considera un buen modelo; la practicidad de su uso se puede discutir debido a la cantidad de variables que intervienen. Para simplificar el uso del modelo anterior se eliminó la variable nivel longitudinal y se obtuvo un modelo lineal 7 con un R^2 de 76,07 por ciento, lo cual explica de manera muy similar que el modelo anterior la variabilidad de la densidad. Por lo mencionado, se considera más práctico el uso este modelo lineal 7 al utilizar menos variables y explicar de forma muy similar la variabilidad de la densidad. Otra forma de simplificar el modelo 5, fue eliminar la variable condición de humedad, pero se obtuvo un modelo lineal 6 con un R^2 de 65,81. Al ser el R^2 corregido menor, este modelo

explica menos la variabilidad de la densidad que los modelos anteriores 5 y 7, pero no la deja de explicar de forma aceptable.

Al ser el R^2 corregido del modelo 7 mayor que la del modelo 6, se puede decir que la condición de humedad influye más que el nivel longitudinal en la determinación de la densidad con Pilodyn, por lo cual los análisis de regresión lineal simple realizados en puntos anteriores para cada condición de humedad no se consideró el nivel longitudinal como una variable dentro de los modelos.

El aumento de los R^2 para los modelos obtenidos por medio de un análisis de regresión lineal múltiple, se debe al aumento en la cantidad de variables que forman parte de los modelos, siendo los modelos con mayor cantidad de variables los que mayor R^2 presentan, teniendo ciertas variables mayor o menor influencia en el modelo.

3. COMPARACIÓN CON OTROS ESTUDIOS REALIZADOS

La comparación se realizó tomando como criterios de similitud la densidad y el contenido de humedad al que se realizó la evaluación.

INIA (2018) obtuvo coeficientes de determinación (R^2) de 0,67, 0,20 y 0,40 para plantaciones de Tornillo de 35, 26 y 18 años, con densidades básicas promedio de 0,47 , 0,52 y 0,48 g/cm³ respectivamente. Si bien en el presente estudio no se ha utilizado la densidad básica para el análisis de regresión lineal, los modelos obtenidos para densidad en Tornillo dieron R^2 mayores, excepto si se comparan con el de la plantación de 35 años. Esto quiere decir el Pilodyn puede servir como estimador de la densidad básica.

Para el presente estudio se halló una densidad de equilibrio de 0,49 g/cm³ para Tornillo, obteniéndose un R^2 corregido de 0,5 para el modelo 3. Este modelo se puede comparar con los encontrados por Bobadilla *et al.* (2007) para tres especies de Pino. El R^2 que se encontró en el modelo 3 es superior al encontrado por Bobadilla para las tres especies de Pino, siendo el R^2 más cercano el encontrado para *Pinus nigra Arn*, el cual es de 0,49.

Costa (2012) obtuvo modelos para determinar la densidad en equilibrio a partir de la penetración con Pilodyn en 7 especies forestales, obteniendo una densidad promedio de 0,87 g/cm³. Dentro de los modelos obtenidos en la presente investigación, el modelo 7 para Capirona es el que se comparó con el obtenido por Costa, quien obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 76 por ciento, 68 por ciento y 59 por ciento para las direcciones longitudinal, tangencial y radial, respectivamente; el R^2 obtenido para el modelo 7 es de 0,76, siendo este coeficiente de determinación similar al encontrado para la penetración en dirección longitudinal. Costa considera, de acuerdo a sus resultados, al Pilodyn como un método eficiente para inferir la densidad.

Giraldo *et al.* (2014) obtuvo un R^2 de 0,46 para la especie *Eucalyptus pellita* al determinar un modelo para los datos de densidad y penetración en condición verde (saturada), por lo cual se comparó con el modelo 1 para el Tornillo el cual tiene un R^2 de 0,57. A pesar de tener el modelo 1 un mayor coeficiente de determinación que el encontrado por Giraldo, no se puede considerar este modelo como eficiente para la estimación de la densidad.

V. CONCLUSIONES

- 1) La influencia de la humedad en la determinación de la densidad por penetración del Pilodyn, es más notoria en condición de equilibrio para ambas especies
- 2) Los resultados muestran relaciones promisorias entre la determinación indirecta de la densidad por Pilodyn, siendo el factor crítico en la variación de las relaciones la condición de humedad.
- 3) En la Capirona los resultados de la penetración del Pilodyn muestran una tendencia creciente desde el nivel basal al apical.
- 4) El Pilodyn es un equipo eficiente para penetraciones por encima de cinco milímetros, ya que por debajo de este valor el error aumenta.
- 5) Las ecuaciones que mejor se ajustan a las variables estudiadas son:

Tornillo: $D = 0,7368 - 0,0138044 P - 0,0326402 CH$ (2)

Capirona: $D = 1,31324 - 0,00296666 P - 0,162063 CH - 0,0250649 N$ (5)

VI. RECOMENDACIONES

- Complementar este estudio con un mayor número de repeticiones para mejorar la estimación indirecta de la densidad
- Determinar el punto de saturación de las fibras para cada especie en estudio, para de esa manera realizar un mejor ajuste de la relación densidad saturada – penetración del Pilodyn.
- Complementar este estudio con evaluaciones en especies forestales de distintas densidades, para obtener una ecuación ajustada a un modelo que permita determinar la densidad de distintas maderas a través de una evaluación con Pilodyn.
- Tener especial cuidado en el uso del Pilodyn en maderas de alta densidad, ya que bajo ciertas condiciones de humedad, este equipo podría dar valores menos precisos.
- Realizar estudios anatómicos de las maderas evaluadas que expliquen su comportamiento a ciertos cambios de humedad, en la evaluación con Pilodyn.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, M.; Kikata, Y. 1994. Atlas de Maderas del Perú, UNALM - Universidad de Nagoya Japón. Lima, PE. 202 p.
- Aróstegui, A. 1974. Estudio tecnológico de maderas del Perú (Zona Pucallpa): características tecnológicas y usos de la madera de 145 especies del país. Lima, PE, UNALM. v.1, 483 p.
- _____, A. 1973. Aptitud de 10 Maderas Nacionales en la Industria de la Construcción. Lima, PE. 150 p.
- _____, A. 1982. Recopilación y Análisis de Estudios Tecnológicos de maderas peruanas. Lima, PE. PNUD- FAO. 57 p.
- Bobadilla, I.; Herrero, ME.; Íñiguez, G.; Arriaga, F.; Ballarín, D.; Palacios, J. 2007. Estimación de la densidad de la madera aserrada de coníferas mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad. Informes de la construcción 20: 107-116.
- Bustamante, K. 2017. Caracterización anatómica de la madera y el carbon de cinco especies forestales para su identificación. Lima, PE. UNALM. 126 p.
- Cañas, I. 2013. Capacidad de predicción del Penetrómetro “Pilodyn” en la determinación de la densidad de la madera. Tesis Mg. Valladolid, ES. Universidad de Valladolid. 118 p.
- Casado, M.; Pinazo, O.; Basterra, A.; Acuña, L. 2005. Técnicas de ensayos no destructivos en madera estructural mediante extracción de tornillos: aplicación en viguetas de forjado de un edificio singular. Actas del IV Congreso Nacional de protección de la madera. San Sebastián, ES. CIDEMCO. 12p.
- Chavesta, M. 1995. Maderas para parquet. CONCYTEC. Lima, PE, UNALM. 101p.
- _____. 2005. Maderas para pisos. Lima, PE, UNALM. 176 p

- Condori, C. 2007. Propiedades mecánicas de *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Tornillo) proveniente de dos tipos de plantaciones y diferentes edades del Centro de Investigación Jenaro Herrera – Loreto. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 117. p.
- Costa, R. 2012. Qualificação dos ensaios não destrutivos para estimar as características físico-mecânicas da madeira. Tese mestre em Engenharia de Estruturas. Belo Horizonte, BR. Universidade federal de minas gerais escola de engenharia. 75 p.
- De Jesus, H.; Wagner, A.; Villamagua-Vergara, G.; Sebastiao, S. 2017. Efecto del manejo silvícola sobre la densidad básica de la madera en sistemas forestales de rotación corta. *Maderas Ciencia y tecnología* 19(3): 285 – 292
- De la Mata, J. 2011. Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas. Madrid, ES. Universidad Politécnica de Madrid. 149 p.
- Durán, P. 2003. Evaluación de las propiedades mecánicas de la madera de *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Tornillo) proveniente de plantaciones, con respecto a la influencia de cuatro factores de crecimiento. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 105 p.
- Evans, R.; Downes G.M.; Raymond, C.A.; Hudson I.L.; Dean G.H.; Michell A.J.; Schimleck, L.R.; MUNERI, A. 1997. Sampling plantation eucalyptus. AT, CSIRO. 124p.
- Fakopp Enterprise Bt. 2010. User's guide Screw withdrawal resistance meter. Agfalva, HU. 5p.
- Flores, Y. 2002. Crecimiento y productividad de Plantaciones de seis especies forestales nativas de 20 años de edad en el Bosque Alexander Von Humboldt, Amazonía Peruana. Tesis MSc. Turrialba, CR. CATIE. 124p.
- _____. 2018. Árboles Nativos de la Región de Ucayali. Estación Experimental Agraria Pucallpa. Pucallpa, PE. 375p.
- Hansen, CP. 2000. Application of the Pilodyn in Forest Tree Improvement. DFSC Series of Technical Notes. TN55. Humlebeak, DK. Danida Forest Seed Centre. 11p.

- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agraria). 2018. Estimación indirecta de la densidad básica mediante el uso del Pilodyn en la especie Tornillo *Cedrelinga cateniformis* procedente de plantaciones de diferentes edades en Loreto. Informe técnico N°1. Lima, PE. 19p.
- Íñiguez, G. 2007. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis Dr. Madrid, ES. Universidad Politécnica de Madrid. 223p.
- Kollman, F; Cote, W. 1984. Principles of wood science and technology. Munich, DE. Springer-Verlag V.2, 592 p.
- León, W; Espinoza de Pernía, N. 2001. Anatomía de la madera. Mérida, VE. Universidad de los Andes. 510 p.
- López, J. 1970. Estudio Silvicultural de la especie *Cedrelinga cateniformis* Ducke. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 89 p.
- Martínez, E. 2005. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Madrid, ES. Anuario jurídico y económico escurialense 38: 315 - 332
- Meléndez, M. 1999. Parámetros básicos de corte con sierra cinta en el aserrío de la Capirona *Calycophyllum spruceanum*. Tesis MSc. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 71 p.
- Monteoliva, S. 2011. Determinación de densidad de la madera de sauces con Pilodyn: calibración. III Jornadas Argentinas de Salicáceas. Neuquén, AR. 5p.
- Navarrete, E.; Figueroa, X.; Novoa, P.; Espinosa, M. 2009. Efecto del manejo silvícola y clase de copa sobre la densidad básica de *Eucalyptus nitens*. Curitiba, BR. FLORESTA 39(2): 345 – 354
- Pantigoso, J. 2009. Propiedades físicas y mecánicas de la capirona (*Calycophyllum spruceanum* (Benth) hook ex Schumann) procedente de una plantación experimental en San Alejandro Ucayali-Perú. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 133 p.
- Reynel, C; Pennington R.T; Pennington T.D; Flores, C.; Daza, A.; 2003. Árboles Útiles de la Amazonía Peruana y sus Usos. Darwin Initiative – ICREF. Lima, PE. 509 p.

- Ross, R. 1992. Nondestructive evaluation of civil structures and materials: nondestructive testing of wood. Colorado, US. University of Colorado. p.43- 47
- Ross, R.; Pellerin, R. 1994. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A review. Wisconsin, US. USDA. 42p.
- Silva, Z. 2005. Características Anatómicas y propiedades físicas de *Cedrelinga cateniformis* Ducke. (Tornillo) de diferentes edades, proveniente de plantaciones de Jenaro Herrera. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 105 p.
- Sotelo. 2006. Genetic variation and correlations between growth and wood density of *Calycophyllum spruceanum* at an early age in the peruvian amazon. Quebec, CA, Universidad Laval. 23 p.
- Soudre, K. 2004. Influencia de cuatro factores de crecimiento en la variación de la propiedades físicas en la madera de *Cedrelinga cateniformis* Ducke (Tornillo), de las plantaciones establecidas en el Bosque Alexander Von Humboldt, Ucayali. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 109 p.
- Vega, N. 2011. Evaluación de las propiedades Físico mecánicas de *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke procedente de plantaciones de 20 años del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt, Ucayali (Perú). Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria la Molina. 178 p.
- Vignote, S.; Martínez, I.; Villasante, A. 2013. Silvicultura y calidad de la madera. Madrid, ES. 56p.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

CONSTANCIA DE IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE

	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES: FAX: 349-2041, TEF: 349-5647 / 349-5669, Anexo .203 APDO.456 - LA MOLINA LIMA PERU	
---	---	---

CONSTANCIA

El que suscribe, JEFE DEL LABORATORIO DE ANATOMÍA DE LA MADERA, deja constancia que, de acuerdo con los estudios anatómicos efectuados, las muestras de madera proporcionadas por el **Bach. PIERO ISRAEL PANEBRA SALIROSAS**, ex alumno de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria la Molina, empleadas en su trabajo de tesis titulado: "Evaluación no destructiva de la densidad en maderas de plantaciones de dos especies forestales"; corresponden a:

<u>Muestras</u>	<u>Nombre Común</u>	<u>Nombre Científico</u>	<u>Familia</u>
1	Tornillo	<i>Cedrelinga cateniformis</i> Ducke	Mimosaceae
2	Capirona	<i>Calycophyllum spruceanum</i> (Bentham) Hooker f. ex Schumann	Rubiaceae

Atentamente,


Ing. Manuel Chavesta Custodio
Lab. Anatomía de la Madera



La Molina, 16 de Noviembre de 2018

ANEXO 2

ANÁLISIS DE VARAINZA DE LAS PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS Y DESTRUCTIVAS ENTRE LOS ÁRBOLES DE LAS ESPECIES EN ESTUDIO

<i>Tornillo</i>	
<i>Prueba No Destructiva</i>	<i>ANOVA</i>
Pilodyn Tangencial (mm)	S
Pilodyn Radial (mm)	S
<i>Prueba Destructiva</i>	<i>S</i>
Densidad (g/cm ³)	S
<i>Capirona</i>	
<i>Prueba No Destructiva</i>	<i>ANOVA</i>
Pilodyn Tangencial (mm)	S
Pilodyn Radial (mm)	S
<i>Prueba Destructiva</i>	<i>S</i>
Densidad (g/cm ³)	N.S

ANEXO 3

CONTENIDO DE HUMEDAD Y ALTURA PARA LOS FACTORES CONDICIÓN DE HUMEDAD Y NIVEL LONGITUDINAL

Factor	Especie	Tornillo	Capirona
		Contenido de humedad (%)	Contenido de humedad (%)
Condición de humedad	Saturada	48,56 - 163,16	34,06 - 83,37
	Equilibrio	12,18 - 17,68	13,59 - 16,77
	Anhidro	-	-
Nivel Longitudinal		Altura (m)	Altura (m)
	Basal	0 - 3.	0 - 3.
	Intermedio	3 - 9.	3 - 9.
	Apical	9 - 15.	9 - 15.

ANEXO 4

DATOS DE DAP, ALTURA TOTAL Y ALTURA COMERCIAL TOMADOS EN CAMPO PARA TORNILLO

<i>N°</i>	<i>Código árbol</i>	<i>DAP (cm)</i>	<i>Ht (m)</i>	<i>Hc (m)</i>
1	1	65,3	17	9
2	2	53,2	18	10
3	3	52,2	20	7
4	4	52,8	18	8
5	5	45,8	21	10
6	6	50,3	22	12
7	7	48,2	20	10
8	8	48,2	20	13
9	9	36,1	28	24
10	10	50	30	8
11	11	62	28	6
12	12	47,5	30	7
13	13	52	22	7
14	14	42,4	25	6
15	15	44,8	22	6
16	16	34,4	20	5
17	17	65,7	18	4
18	18	46,5	18	4

ANEXO 5

DATOS DE DAP, ALTURA TOTAL Y ALTURA COMERCIAL TOMADOS EN CAMPO PARA CAPIRONA

<i>N°</i>	<i>Código árbol</i>	<i>DAP (cm)</i>	<i>Ht (m)</i>	<i>Hc (m)</i>
1	1	26,5	23,5	16,5
2	2	22,6	22	15,5
3	3	21	21	15
4	4	23,4	21	14
5	7	22,5	21,5	14
6	8	18,8	19	9
7	12	25	24	6,5
8	14	24,3	22	14
9	15	25,2	20	11
10	16	22,1	22,5	15
11	17	29,9	24	12
12	18	16,1	20	13,5
13	20	25,5	24	14
14	21	24,5	25	16
15	22	24,2	24	13,5
16	23	22,2	24	11,5
17	24	23	24	11
18	25	19,8	23,5	8

ANEXO 6

FOTOGRAFÍAS DE LA EVALUACIÓN



SATURACIÓN DE PROBETAS DE TORNILLO



DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD POR EL MÉTODO DE INMERSIÓN



EVALUACIÓN CON PILODYN EN CONDICIÓN SATURADA



SECADO EN HORNO DE PROBETAS DE CAPIRONA



PROBETAS DE CAPIRONA EN DESECADOR CON SÍLICAGEL



PROBETA DE CAPIRONA Y DE TORNILLO LUEGO DE ENSAYOS CON PILODYN