

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA MEDIANTE INDENTACIÓN  
INSTRUMENTADA DE CORTEZAS DE MADERA**

**JUAN DAVID BERMUDEZ ROA  
SAUL STIVE SERRANO BARRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA MEDIANTE INDENTACIÓN  
INSTRUMENTADA DE CORTEZAS DE MADERA**

**JUAN DAVID BERMUDEZ ROA  
SAUL STIVE SERRANO BARRERA**

Tesis de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico

**Director**

**ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS**

PhD. Ingeniería Mecánica.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

A dios por guiarme en cada una de las decisiones que he tomado, a mis padres por enseñarme que rendirme no es una opción, a mis hermanos y a Sara por acompañarme siempre y apoyarme durante este proceso.

Juan David Bermúdez Roa.

A mi Padre, por estar siempre en los momentos importantes de mi vida, por ser el ejemplo para salir adelante y por los consejos que han sido de gran ayuda para mi vida y crecimiento. Gracias por confiar en mí y darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida.

A mi Madre, por ser la amiga y compañera que me ha ayudado a crecer, gracias por estar siempre conmigo en todo momento, gracias por el amor que me das, por tus cuidados durante toda mi vida.

A mi hermano, que con su amor y ejemplo me motiva a cada vez ser el mejor en lo que hago.

A mi princesa, por ser esa persona en la cual puedo confiar y contar en cualquier momento, por motivarme a ser feliz, a tener siempre un motivo para reírme.

A mi novia, mi niña hermosa gracias por permitirme formar parte de tu vida, por tu apoyo incondicional, pero sobre todo gracias por enseñarme a creer en mí y motivarme a hacer las cosas de la mejor manera.

A mis abuelitas, mis Anas que no están físicamente conmigo, pero yo sé que desde cielo me están cuidando y me guían en todo momento para ser cada vez mejor persona.

Saul Serrano.

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro director de proyecto Doctor Alberto Pertuz Comas por su apoyo incondicional durante el desarrollo de este proyecto.

A la escuela de Ingeniería Mecánica, ya que sin el apoyo y asesoría de sus profesores no hubiese sido posible culminar este proyecto.

Al laboratorio de tribología de Ingeniería Mecánica por su colaboración con el préstamo del equipo el cual fue fundamental para el desarrollo del proyecto.

A la escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales por permitirnos utilizar los equipos de laboratorio necesarios para la elaboración de las probetas.

A la escuela de Diseño Industrial por el préstamo de los talleres para la adecuación de las maderas.

A la escuela de Ingeniería Química por la asesoría y préstamo del material de laboratorio necesario para desarrollar este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS .....	20
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
2.1. PREPARACIÓN DE PROBETAS .....	21
2.2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD.....	22
2.3. ENSAYOS DE INDENTACIÓN INSTRUMENTADA.....	22
2.4. ENSAYOS DE DUREZA VICKERS .....	23
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	25
3.1. MICROSCOPIA ÓPTICA.....	25
3.2. CONTENIDO DE HUMEDAD .....	26
3.3. DUREZA, MÓDULO DE YOUNG Y RIGIDEZ DE CONTACTO.....	27
3.4. LÍMITE ELÁSTICO .....	29
3.5. DUREZA ABSOLUTA.....	29
3.6. INDENTACIÓN INSTRUMENTADA .....	30
3.7. ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LAS MUESTRAS DE MADERA .....	32
4. CONCLUSIONES.....	34
REFERENCIAS .....	36
BIBLIOGRAFIA.....	39
ANEXOS .....	42

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Contenido de humedad de las cortezas.....	26
Tabla 2. Valor de dureza, módulo de Young y rigidez de contacto en cada dirección de las muestras de maderas, (a) Coco, (b) Macadamia, (c) Palma de Lata y (d) Palma Real.....	27
Tabla 3. Límite elástico de las muestras de madera.....	29
Tabla 4. Dureza absoluta de las muestras de madera.....	30
Tabla 5. Valores de Tenacidad para todas las muestras de madera.....	32

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama esquemático de la curva de carga y descarga obtenida mediante indentación con registro de carga y desplazamiento.....	19
Figura 2. Principales direcciones de la madera.....	21
Figura 3. Bruker´s UMT TriboLab.....	23
Figura 4. Micro-durómetro INNOVATEST.....	24
Figura 5. Estructura microscópica de las muestras de madera en todas las direcciones (axial radial y transversal). (a) Coco, (b) Macadamia, (c) Palma de Lata, (d) Palma Real.....	25
Figura 6. Curvas experimentales P-h realizadas en las diferentes direcciones para, (a)Coco, (b)Macadamia, (c)Palma de Lata y (d) Palma Real.....	31

## ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Curvas P-h arrojadas por el TriboLab Viewer software de todas las muestras de madera para cada carga.....	42
Anexo B. Huella de indentación Vickers de las muestras de madera.....	49

## GLOSARIO

$\sigma_y$	Límite elástico
CH	Contenido de humedad
$E$	Módulo de Young
$H$	Dureza
$H_o$	Dureza absoluta
IIT	Ensayo de indentación instrumentada
O&P	Oliver y Pharr
$S$	Rigidez de contacto
$U$	Tenacidad
$W_{el}$	Energía elástica
$W_{pl}$	Energía plástica

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACION MECANICA MEDIANTE INDENTACIÓN INSTRUMENTADA DE CORTEZAS DE MADERA<sup>1</sup>

**AUTOR:** Juan David Bermúdez Roa, Saul Stive Serrano Barrera<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Indentación instrumentada, propiedades mecánicas, madera.

El presente estudio se enfoca en la determinación de las propiedades mecánicas de cuatro especies de madera; Coco (*Cocos nucifera*), Macadamia (*Macadamia integrifolia*), Palma de Lata (*Bactris guineensis*) y Palma Real (*Roystonea regia*), en las tres direcciones (axial, radial y transversal), mediante pruebas de indentación instrumentada utilizando un indentador piramidal de base cuadrada (Vickers) de acero a diferentes cargas de indentación, se empleó el método propuesto por Oliver y Pharr a fin de determinar numéricamente algunas de las propiedades mecánicas del material, tales como el número dureza, módulo Young y rigidez de contacto, a partir de estos resultados obtenidos se emplearon los modelos propuestos por Tabor y Thomas los cuales permiten encontrar el valor del límite elástico y la dureza absoluta respectivamente mediante un modelo matemático para cada una de las muestras de madera estudiadas, además se halló el valor de la tenacidad de todas las muestras utilizando las curvas de carga – descarga (P-h) obtenidas durante todas las pruebas de laboratorio, finalmente se hizo un análisis comparativo entre la estructura - propiedad para cada una de las muestras de madera. Dando como resultado que la Palma de Lata presenta mejores características mecánicas en comparación con las otras especies presentado valores de dureza y módulo de Young, tenacidad y límite elástico de 0,2002 GPa; 3,1243 GPa; 52,985  $\mu$ J y 0,1283 GPa respectivamente las cuales fueron halladas a un contenido de humedad del 14,87%. Los resultados obtenidos indican que la prueba de indentación instrumentada es promisoría para la determinación de las propiedades mecánicas de la madera.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas. PhD ingeniería mecánica.

## ABSTRAC

**TITLE:** MECHANICAL CHARACTERIZATION BY MEAN OF INSTRUMENTED INDENTATION OF WOOD BARK<sup>3</sup>

**AUTHOR:** Juan David Bermúdez Roa, Saul Stive Serrano Barrera<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** Instrumented indentation, Mechanical properties, Wood.

The present study focuses on the determination of the mechanical properties of four wood species; Coco (*Cocos nucifera*), Macadamia (*Macadamia integrifolia*), Palma de Lata (*Bactris guineensis*) and Palma Real (*Roystonea regia*), in three directions (axial, radial and transverse), by means of tests of instrumented indentation using a base pyramidal indenter square (Vickers) of steel at different indentation loads, the method proposed by Oliver and Pharr was used in order to determine numerically some of the mechanical properties of the material, such as hardness number, Young modulus and contact stiffness, from These results were obtained, using the models proposed by Tabor and Thomas, which allow finding the value of the elastic limit and the absolute hardness respectively, by means of a mathematical model for each of the wood samples studied. In addition, the value of the tenacity of all the samples using the load - discharge (P-h) curves obtained during all the laboratory tests, finally a comparative analysis between the structure - property for each of the wood samples. Resulting in the fact that the Palma de Lata presents better mechanical characteristics compared to the other species, presented values of hardness, Young's modulus, tenacity and elastic limit of 0.2002 GPa; 3.1223 GPa; 52,985  $\mu$ J and 0,1283 GPa respectively, which was found at a moisture content of 14.87%. The results obtained indicate that the instrumented indentation test is promising for the determination of the mechanical properties of the wood.

---

<sup>3</sup> Degree Proyect

<sup>4</sup> Faculty of physical-mechanical engineering. School of mechanical engineering. Director: Alberto David Pertuz Comas. PhD Ingeniería mecánica.

## INTRODUCCIÓN

Desde hace miles de años la madera ha sido empleada para una gran variedad de usos, muchos de ellos relacionados con la construcción y la fabricación de todo tipo de objetos. En sus primeras aplicaciones, la madera fue empleada sin demasiada elaboración a parte del descortezado y moldeado para adecuarlas a las dimensiones requeridas para su uso [1]. Siempre hemos sentido la necesidad de dominar el medio que nos rodea a través del descubrimiento y conocimiento de los materiales que la naturaleza nos ofrece y de esta manera encaminar el desarrollo con base a estos conocimientos obtenidos para transformar materiales y fabricar herramientas que nos ayuden a desempeñar las labores diarias [2].

Para adquirir estos conocimientos, en la actualidad se han implementado diferentes pruebas que nos permiten tener una idea de las características de los materiales que utilizamos, la prueba de dureza es ampliamente utilizada para el control de calidad en la industria porque es fácil de aplicar y prácticamente es no destructiva [3]. Dentro de las diferentes propiedades resistentes de la madera como pueden ser la resistencia a la flexión, resistencia a tracción, resistencia a compresión, módulo de elasticidad, etc., la dureza ha sido una sobre las que menor número de ensayos se han llevado a cabo [1], uno de los ensayos que nos permite estudiar la dureza es la técnica de indentación instrumentada (IIT), la cual está siendo ampliamente utilizada para la determinación de las propiedades mecánicas, ya que ofrece un conjunto de ventajas respecto a las técnicas convencionales, porque permite realizar indentaciones selectivas, requiere muy poco material de ensayo y es una técnica muy versátil que permite obtener las propiedades mecánicas de materiales a partir de las curvas de carga-descarga (P-h), utilizando el método de Oliver y Pharr (O&P) [4][5]. Sin embargo, un requerimiento que se debe cumplir con el fin de que los resultados suministrados con esta técnica sean reproducibles, es que las probetas deben ser plano-paralelas, ya que de esta manera se reduce la componente normal durante los ensayos de indentación [6]. Según Pérez [7] el contenido de humedad en la madera influye en la capacidad mecánica, es decir, un

contenido menor de humedad en el punto de saturación de las fibras (28-30% CH), en general aumenta la capacidad mecánica, es decir se incrementa la resistencia de la madera, tanto en flexión estática, compresión paralela y compresión perpendicular, ya del punto de saturación de la fibra, un aumento en el contenido de la humedad no hay ninguna incidencia sobre la resistencia de la madera. J. Doyle et al. [8] proporciona un trasfondo histórico para las pruebas de dureza convencionales realizadas en muestras de madera, y revisan las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos utilizados, además sugieren un nuevo método que utiliza un incrustador de cuña. M. Barletta[9] definió un protocolo experimental estandarizado para revisar la fiabilidad de las propiedades mecánicas locales de muestras de madera (*Pinus sylvestris*) en las tres principales direcciones (axial, radial y tangencial), obtenidas mediante IIT, dando como resultado que esta prueba parece ser una técnica muy prometedora y efectiva para dicha caracterización. A. Klüppel [10] Este estudio probó la posibilidad de determinar la dureza Brinell de la madera mediante indentación instrumentada sin medir visualmente el diámetro de la impresión. La dureza de la madera de Haya (*Fagus sylvatica*) y de la madera de pino (*Pinus sylvestris*) se determinó convencionalmente y se comparó con el método IIT. A partir de este estudio concluyo que, para estudios comparativos, el cálculo de la dureza a partir de la profundidad máxima o la profundidad de contacto utilizando la función de área teórica podría ser una alternativa razonable y suficiente. Pero debe considerarse que el método no tiene una base física y los valores correspondientes pueden diferir sustancialmente de la dureza Brinell. Tabor [11] construyó un modelo teórico para la indentación de metales, validado por sus experimentos y experimentos de otros, que en principio podrían explicar la correlación entre dureza y resistencia a la tracción, la variación de dureza observada en los materiales de endurecimiento por deformación y expresada empíricamente por las leyes de Meyer, y las diferencias entre los valores de dureza medidos con indentadores de diferentes geometrías. Proporcionó un enlace directo y cuantitativo entre la prueba de dureza y la curva tenso - compresiva de tensión - deformación [12].

$$H \approx 1,4\sigma_y \quad (1)$$

Siendo  $\sigma_y$  el valor del límite elástico, se muestra que la dureza de indentación de materiales dúctiles es esencialmente una medida de sus propiedades plásticas. Existe un gran componente hidrostático de tensión alrededor de la hendidura y, dado que esto no desempeña ningún papel en el flujo plástico, la presión de indentación es apreciablemente mayor que la tensión de flujo uniaxial del material, para muchos materiales es aproximadamente tres veces más grande, pero si el material muestra una elasticidad apreciable, el rendimiento del interior elástico impone menos restricciones al flujo plástico y el factor de proporcionalidad puede ser considerablemente menor que tres [13]. Bückle [14] hace un análisis de la evolución de la dureza en relación con la carga, este análisis muestra que el valor medido de la dureza depende en gran medida del rango de carga. Por lo tanto, es necesario indicar para qué carga se obtiene el valor de dureza. Esta dependencia de la carga con la dureza se denomina efecto de tamaño de indentación (ISE) y se ha atribuido a una amplia variedad de mecanismos [15]. Thomas [16] sugirió una relación lineal entre la dureza y el inverso de la diagonal de la indentación, donde  $H_0$  es la dureza absoluta y B es una constante.

$$H = H_0 + \frac{B}{a} \quad (2)$$

Como propiedad física de los materiales la tenacidad  $U$  se define como la energía que absorbe un material como consecuencia de las deformaciones, este valor puede ser determinado mediante IIT, de las curvas P-h se puede determinar el valor de la energía elástica ( $W_{el}$ ) y la energía plástica ( $W_{pl}$ ), estas energías se pueden hallar cuantitativamente como el área bajo la curva de carga-descarga, como se muestra en la Figura 1, siendo  $W_{pl}$  la cantidad de energía que absorbe el material cuando se produce una deformación plástica obedeciendo al concepto de tenacidad.

Figura 1. Diagrama esquemático de la curva de carga y descarga obtenida mediante indentación con registro de carga y desplazamiento.



El presente trabajo tiene como objetivo determinar las propiedades mecánicas a través del ITT a diferentes cargas de indentación, y relacionarlas mediante el modelo propuesto por Tabor [13] con otras propiedades mecánicas determinadas a partir de otros ensayos, además hallar el valor de la dureza absoluta de cada material utilizando el modelo de Thomas [16].

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar el comportamiento mecánico de cortezas de madera utilizando la técnica de la indentación instrumentada.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

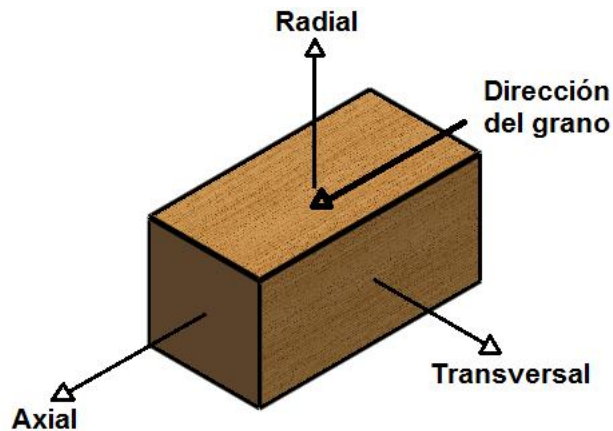
- Determinar el valor de la dureza absoluta utilizando el modelo de Thomas para las cortezas Coco (*Cocos nucifera*), Macadamia (*Macadamia integrifolia*), Palma de Lata (*Bactris guineensis*) y Palma Real (*Roystonea regia*).
- Obtener las curvas P-h para determinar el valor de la tenacidad de las cortezas de Coco (*Cocos nucifera*), Macadamia (*Macadamia integrifolia*), Palma de Lata (*Bactris guineensis*) y Palma Real (*Roystonea regia*)
- Determinar el valor de las propiedades elásticas de las cortezas de Coco (*Cocos nucifera*), Macadamia (*Macadamia integrifolia*), Palma de Lata (*Bactris guineensis*) y Palma Real (*Roystonea regia*) utilizando el método de Oliver - Pharr.
- Analizar la relación estructura propiedad entre las propiedades mecánicas obtenidas de las cortezas de madera anteriormente estudiadas a fin de correlacionarlas matemáticamente a través de las curvas P-h y dureza vs carga.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. PREPARACIÓN DE PROBETAS

Para esta investigación se utilizaron cuatro especies de maderas; Coco, Macadamia, Palma de Lata y Palma Real, las cuales para cada especie se sacó una muestra de cada dirección; radial, transversal y axial (Ver Figura 2), a cada una se le determino el contenido de humedad y después se encapsuló en resina epoxi para facilitar la realización de la prueba de indentación.

Figura 2. Principales direcciones de la madera.



Una vez obtenidas las probetas se pasaron por una desbastadora con la finalidad de asegurar que las caras quedaran plano – paralelas, al realizar el desbaste se tuvo en cuenta de que la presión no fuera exagerada para que las distorsiones no fueran muy importantes ni para que la temperatura de la superficie se elevara demasiado, ya desbastadas las probetas se pasaron por una serie de papeles abrasivos que comenzaron con un tamaño de grano de 100, seguidos del 200, 300, 400, 600, 1000, para terminar con el 1200 y 1500. Este desbaste se hizo de manera manual colocando el papel abrasivo sobre una placa plana y limpia y moviendo la probeta longitudinalmente de un lado al otro del papel aplicando una presión suave y manteniendo la misma dirección para que todas las rayas fueran paralelas. La operación se hizo en seco con el fin de evitar el cambio en el contenido de humedad de las muestras. Finalmente, se les hizo un pulido con el objetivo de eliminar las

rayas finas producidas en el paso anterior con el fin de crear una superficie lo más lisa posible. Una vez terminados estos procesos se llevaron las muestras al microscopio a un aumento de 100X, 200X y 500X para visualizar su estructura como se puede observar en la Figura 6.

## **2.2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD**

El contenido de humedad se define como la masa de agua contenida en una pieza de madera, expresada en porcentaje respecto de la propia masa de madera de esta pieza en estado anhidra. Este factor influye en el comportamiento de la madera sobre su durabilidad, resistencia, peso y dimensiones; entre otros aspectos.

Según la NTC 206-1 [17] establece un método para la determinación del contenido de humedad cuyo principio es determinar la pérdida de masa de la probeta secándola hasta masa constante.

## **2.3. ENSAYOS DE INDENTACIÓN INSTRUMENTADA**

La ejecución de las pruebas de indentación instrumentada se realizaron usando un UMT TriboLab fabricado por la compañía Bruker (Ver Figura 3) de acuerdo con los parámetros establecidos por la norma ASTM E2546-15 [18]. Los diferentes ensayos de indentación se efectuaron con un indentador piramidal de base cuadrada de acero, a temperatura ambiente (23°C), realizando los ensayos de indentación a diferentes cargas para cada muestra (300, 500 y 1000 grf). El tiempo de carga-descarga para cada una de las curvas P-h se mantuvieron constantes con un valor de 15 s. Cada valor de dureza  $H$ , módulo de Young  $E$  y rigidez de contacto  $S$ , presente en la Tabla 3, es el resultado del promedio de 5 medidas realizadas para cada condición de ensayo. Los valores de  $H$ ,  $E$  y  $S$  son calculados por el TriboLab Viewer software con los datos obtenidos de la curva P-h que se genera durante el ciclo de carga y descarga.

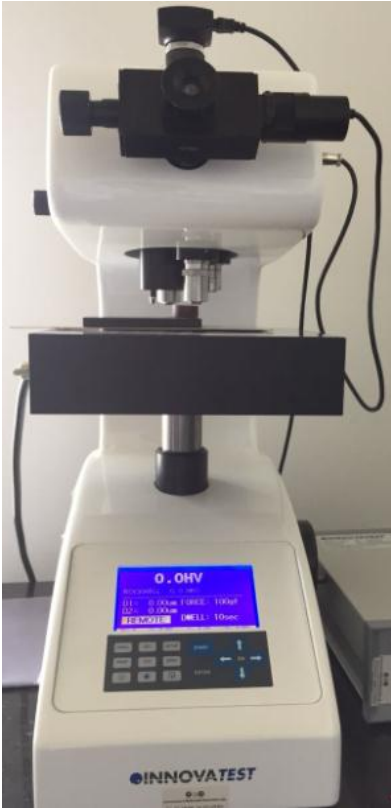
Figura 3. Bruker's UMT TriboLab.



#### **2.4. ENSAYOS DE DUREZA VICKERS**

Las pruebas de dureza Vickers se realizaron usando un micro - indentador INNOVATEST (Ver Figura 4) de acuerdo a la norma ASTM E384-17 [19]. Los diferentes ensayos de indentación se efectuaron con un indentador piramidal de base cuadrada de acero, a temperatura ambiente (23°C), realizando los ensayos de indentación a diferentes cargas para cada muestra (25, 50, 100, 200, 300, 500 y 1000 grf). El cálculo de la dureza absoluta para cada una de las muestras se determinó a partir del promedio de cinco indentaciones Vickers a diferentes cargas.

Figura 4. Micro-durómetro INNOVATEST



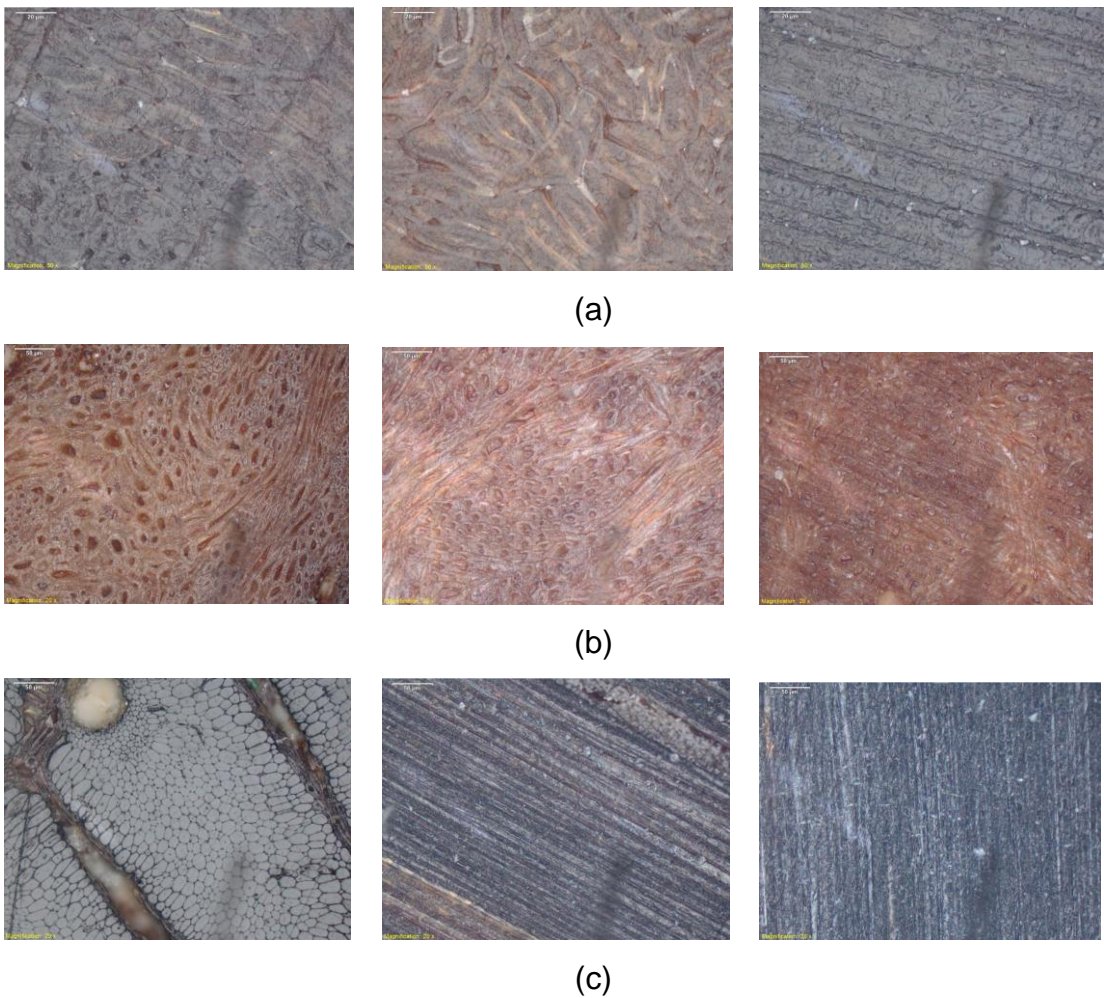
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos en el laboratorio para cada una de las diferentes muestras estudiadas.

#### 3.1. MICROSCOPIA ÓPTICA

La inspección microscópica de la superficie, aporta en muchos casos una valiosa información sobre la morfología de la muestra, la cual es muy importante para identificar y caracterizar los materiales.

Figura 5. Estructura microscópica de las muestras de madera en todas las direcciones (axial radial y transversal). (a) Coco, (b) Macadamia, (c) Palma de Lata, (d) Palma Real.





(d)

La Figura 5, muestra la estructura microscópica de las especies de madera para cada una de las direcciones estudiadas; lo cual permitió identificar que el Coco y la Macadamia presentan estructuras similares entre sí, esta misma característica se presenta entre la Palma de lata y la Palma Real con una estructura diferente a la de las especies mencionadas anteriormente.

### 3.2. CONTENIDO DE HUMEDAD

Se determinó el contenido de humedad para las muestras de madera con el objetivo de garantizar que se encontraran bajo las mismas condiciones, debido a que este es un factor que tiene gran importancia sobre las propiedades mecánicas. Los valores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Contenido de humedad de las cortezas.

Material	m1 (g)	m2 (g)	CH (%)
Coco	12,51	11,14	12,33
Macadamia	2,48	2,21	12,26
Palma de Lata	1,57	1,36	14,87
Palma Real	12,24	10,91	12,13

Se observa en la Tabla 1, que todas las especies tienden a un mismo valor de CH. Estos valores corresponden a maderas que fueron secadas al aire, para CH entre 11% y 21% las propiedades mecánicas no presentan cambios importantes en sus valores [20] lo que hace que este sea un rango óptimo para su caracterización mecánica.

### 3.3. DUREZA, MÓDULO DE YOUNG Y RIGIDEZ DE CONTACTO

Las curvas P-h proporcionan información cualitativa de la dureza de los materiales de estudio. La Figura 6, muestra una serie de curvas de indentación a una carga determinada para cada muestra de madera, con los valores encontrados en estas gráficas se pudo determinar el valor de dureza, módulo de Young y rigidez de contacto.

Tabla 2. Valor de dureza, módulo de Young y rigidez de contacto en cada dirección para las muestras de maderas, (a) Coco, (b) Macadamia, (c) Palma de Lata y (d) Palma Real.

<b>Coco</b>									
<b>Dirección</b>	<b>300 [gf]</b>			<b>500 [gf]</b>			<b>1000 [gf]</b>		
	<b>H</b>	<b>E</b>	<b>S</b>	<b>H</b>	<b>E</b>	<b>S</b>	<b>H</b>	<b>E</b>	<b>S</b>
	<b>[Gpa]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[g/μm]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[g/μm]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[g/μm]</b>
<b>Axial</b>	0,1965	1,7805	25,8188	0,1827	1,5220	29,7744	0,1577	1,1481	34,1698
<b>Radial</b>	0,0813	1,5384	34,8190	0,0787	1,3727	40,7966	0,0885	1,0897	43,0816
<b>Transversal</b>	0,1609	2,8099	44,5150	0,1255	1,9899	46,9726	0,1523	1,9336	51,8736

(a)

<b>Macadamia</b>									
<b>Dirección</b>	<b>300 [gf]</b>			<b>500 [gf]</b>			<b>1000 [gf]</b>		
	<b>H</b>	<b>E</b>	<b>S</b>	<b>H</b>	<b>E</b>	<b>S</b>	<b>H</b>	<b>E</b>	<b>S</b>
	<b>[Gpa]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[g/μm]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[g/μm]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[Gpa]</b>	<b>[g/μm]</b>
<b>Axial</b>	0,1162	1,2632	22,5468	0,1598	1,1568	24,2426	0,1326	0,8094	26,3222
<b>Radial</b>	0,0929	1,9642	41,7134	0,1218	1,9280	46,0774	0,1402	1,5889	50,2304
<b>Transversal</b>	0,0847	2,0311	44,9712	0,1156	2,1966	53,9962	0,1332	1,7656	57,0872

(b)

Palma de Lata									
Dirección	300 [gf]			500 [gf]			1000 [gf]		
	H	E	S	H	E	S	H	E	S
	[Gpa]	[Gpa]	[g/μm]	[Gpa]	[Gpa]	[g/μm]	[Gpa]	[Gpa]	[g/μm]
<b>Axial</b>	0,1788	3,1243	48,1214	0,1796	2,8344	55,7598	0,1715	2,0755	59,9130
<b>Radial</b>	0,1496	2,2099	36,7458	0,1263	1,8797	43,8400	0,1857	1,7027	46,9706
<b>Transversal</b>	0,1217	2,0985	38,8748	0,1257	1,7529	46,1292	0,1410	1,5335	49,1332

(c)

Palma Real									
Dirección	300 [gf]			500 [gf]			1000 [gf]		
	H	E	S	H	E	S	H	E	S
	[Gpa]	[Gpa]	[g/μm]	[Gpa]	[Gpa]	[g/μm]	[Gpa]	[Gpa]	[g/μm]
<b>Axial</b>	0,1704	3,2194	48,4722	0,1643	2,8961	55,7774	0,1661	2,1061	56,4326
<b>Radial</b>	0,0613	1,1452	29,9126	0,0527	0,9936	36,2120	0,0709	1,0047	44,6004
<b>Transversal</b>	0,1244	2,4647	45,2016	0,1373	2,0642	46,4084	0,1474	0,8911	27,4910

(d)

La Tabla 2, muestra el valor de las propiedades mecánicas obtenidas para cada uno de los materiales estudiados, representados a diferentes cargas de indentación para las tres direcciones. Tanto la dureza como el módulo de Young presentan una dependencia con la carga de indentación, esta última es causada principalmente por la influencia de la deformación plástica y formación de grietas que reducen la rigidez del material durante la indentación. Por lo tanto, las mediciones de rigidez son más precisas con cargas de indentación más bajas que causan un poco o ningún aporte de deformación plástica, densificación y la formación de defectos [21]. Para el caso de la dureza, se observa que presenta una pequeña variación de su valor a medida que aumenta la carga, debido a esto se puede comprobar que la dureza en las maderas estudiadas tiende hacia un valor asintótico a cargas de indentación en la escala micro.

La dureza y el módulo de Young obtenidos mediante indentación están relacionados con el área de contacto entre el indentador y la muestra, según el método de O&P,

por tanto, aquellos factores que afecten a la estimación de esta área de contacto afectarán también al módulo elástico y a la dureza.

### 3.4. LÍMITE ELÁSTICO

Para conocer el comportamiento que tienen las maderas estudiadas frente a esfuerzos de tracción a partir de las curvas P-h se empleó el modelo de Tabor [11], con el fin de encontrar el límite elástico cuyos valores se registran en la Tabla 3, el cual nos permite encontrar el esfuerzo máximo que pueden soportar antes de sufrir una deformación permanente.

Tabla 3. Límite elástico de todas las muestras de madera.

Material	Axial			Radial			Transversal		
	300	500	1000	300	500	1000	300	500	1000
	[gf]	[gf]	[gf]	[gf]	[gf]	[gf]	[gf]	[gf]	[gf]
	$\sigma_y$ [GPa]			$\sigma_y$ [GPa]			$\sigma_y$ [GPa]		
<b>Coco</b>	0,1404	0,1305	0,1126	0,0581	0,0562	0,0632	0,1149	0,0896	0,1088
<b>Macadamia</b>	0,0830	0,1142	0,0947	0,0664	0,0870	0,1001	0,0605	0,0826	0,0952
<b>Palma de Lata</b>	0,1277	0,1283	0,1225	0,1069	0,0902	0,1327	0,0869	0,0898	0,1007
<b>Palma Real</b>	0,1217	0,1173	0,1187	0,0438	0,0376	0,0507	0,0888	0,0981	0,1053

En la Tabla 3, se observó que tanto la palma de lata como la palma real, presentan un mayor límite elástico en la dirección paralela a las fibras (Axial) como consecuencia de la elevada resistencia que las cadenas de celulosa presentan ante esta solicitud mecánica, mientras que en sus otras dos direcciones el límite elástico es un poco más bajo debida a la orientación marcadamente longitudinal de la estructura de las palmas, muy preparada para resistir las solicitudes de flexión a que se ve sometido el árbol en pie.

### 3.5. DUREZA ABSOLUTA

A diferencia de otros materiales como el acero o el hormigón, la madera no es un material homogéneo, sino que se compone de una serie de elementos estructurales derivados de su procedencia orgánica que tiene como resultado la anisotropía de este material. Debido a este hecho los valores obtenidos para sus propiedades

mecánicas varían en función de las condiciones en las que se realicen las mediciones. La Tabla 4 muestra los valores de dureza absoluta para todas las muestras.

Tabla 4. Dureza absoluta de las muestras de madera.

<b>Material</b>	<b>Axial</b>	<b>Radial</b>	<b>Transversal</b>
	<b>H [GPa]</b>	<b>H [GPa]</b>	<b>H [GPa]</b>
<b>Coco</b>	0,122	0,095	0,1219
<b>Macadamia</b>	0,1593	0,1527	0,1387
<b>Palma de Lata</b>	0,2002	0,1709	0,1338
<b>Palma Real</b>	0,196	0,0813	0,116

Se observa que a pesar que el Coco y la Macadamia poseen estructuras microscópicas parecidas (ver Figura 5a y 5b), la macadamia muestra un valor de dureza mayor, esto se debe a que el coco presenta una menor resistencia a la deformación en comparación con la macadamia como se muestra en la Tabla 2a y 2b y la dureza se basa en la resistencia que un sólido muestra a la deformación [13]. Se destaca que la Palma de Lata muestra un mejor comportamiento frente a la dureza en comparación con las otras especies de madera estudiadas, esto se debe principalmente a que esta presenta una estructura microscópica en forma de prosenquimatosos, la cual presenta mejor cohesión y entrelazamiento de fibras, al comparar las dos palmas cuyas estructuras son muy similares como se aprecia en la Figura 5c y 5d. Observamos que la palma de lata presenta mayor abundancia de fibras lo cual hace que su deformación requiera de mayor esfuerzo, traduciéndose en un valor más elevado de dureza.

### **3.6. INDENTACIÓN INSTRUMENTADA**

Para todas las muestras, las curvas P-h (ver Figura 6) evidencian un comportamiento de deformación visco – elástico, este es un comportamiento característico de la madera [10]. En la Tabla 5 se muestran y se comparan los

valores de tenacidad para todas las muestras de madera obtenidas mediante la Figura 6.

Figura 6. Curvas experimentales P-h obtenida a partir de una indentación en las diferentes direcciones para, (a) Coco, (b) Macadamia, (c) Palma de Lata y (d) Palma Real.

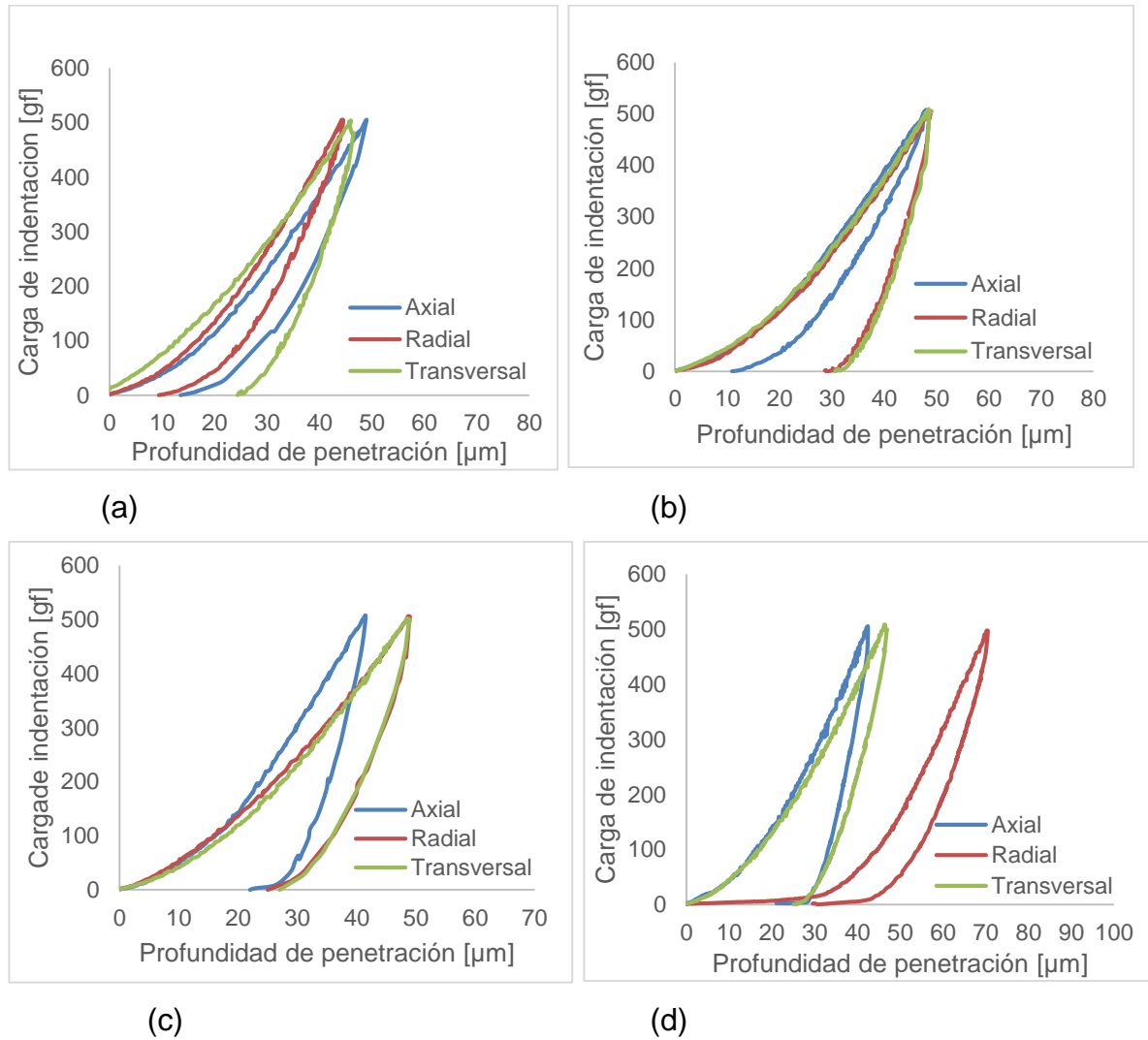


Tabla 5. Valores de Tenacidad para todas las muestras de madera.

Dirección	Coco	Macadamia	Palma de Lata	Palma Real
	U [ $\mu$ J]	U [ $\mu$ J]	U [ $\mu$ J]	U [ $\mu$ J]
<b>Axial</b>	58,169	29,764	52,985	41,478
<b>Radial</b>	29,402	45,154	63,091	35,079
<b>Transversal</b>	64,389	50,383	59,768	58,960

Como se puede observar de la Tabla 5, las maderas presentan valores de tenacidad bajos con respecto otros materiales como el acero, por lo cual se puede establecer que la madera es un material frágil. La tenacidad, como las otras propiedades mecánicas de la madera, está afectada por las características propias del material. La variabilidad depende del tipo de madera que se ensaya, su contenido de humedad, la orientación de los anillos de crecimiento y la dirección de la las fibras, entre otros.

### 3.7. ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LAS MUESTRAS DE MADERA

En esta sección se lleva a cabo el análisis de la relación estructura - propiedad para cada una de las muestras con los datos obtenidos mediante las pruebas de laboratorio.

De la Tabla 4, se pudo establecer que la muestra de Coco y de Macadamia presentan un comportamiento similar frente a la dureza, el cual se caracteriza por tener un valor aproximadamente igual en todas sus direcciones, mostrando un coeficiente de variación de esta propiedad de 13,77% y 7% respectivamente, esto se debe principalmente a que las dos especies poseen una estructura microscópica similar en las direcciones estudiadas, esto se puede observar en la Figura 5a y 5b. Para el caso de la Palma de Lata y la Palma Real en la Figura 5c y 5d se puede apreciar que las muestras presentan una estructura microscópica similar en la dirección radial y trasversal, por lo que se espera que el comportamiento de la dureza en estas direcciones sea aproximadamente igual, en la Tabla 4 se aprecia un cambio en la dureza, presentando un coeficiente de variación de 17,22% y 24,87% respectivamente, este fenómeno, se debe mayormente a la contribución de

los defectos tanto superficiales como no superficiales (tales como dislocaciones, rugosidad superficial, porosidad ocluida, etc.). Debido a la presencia de todos estos defectos distribuidos heterogéneamente en el material, se produce esta variación en los valores de dureza. Por otro lado, en la dirección axial de las dos muestras se evidencia un valor de dureza mayor con respecto a las dos direcciones anteriormente mencionadas, este aumento se debe a que las fibras están firmemente unidas en sus extremos, cuando es aplicada la carga de indentación el indentador hace contacto con un mayor número de fibras lo que requiere de mayor energía para ser penetrado.

Una de las especies de madera que se han estudiado son: el *Dendrocalamus asper* que es una especie de bambú originaria del sudeste de Asia, Subyaktó [22] en 1995 haciendo ensayos con tiras de esta especie de bambú encontró valores para el módulo de Young de 4,4; 4,6 y 3,4 GPa, en condición seca, valores que son similares a los de la Palma Real en la dirección axial radial y transversal de 3,1; 2,2 y 2,09 Gpa y a los de la Palma de Lata de 3,2 1,14 y 2,46 Gpa respectivamente, obtenidos en esta investigación.

Además los resultados que presentó LI [23] en su investigación sobre las propiedades mecánicas obtenidas mediante IIT de tres especies de madera; Nogal (*Juglans regia*), Cerezo (*Cerasus*), Arce (*Acer rubrum*), obtuvo valores de dureza de 0,078; 0,095 y 0,031 GPa y módulo de Young de 2,28; 1,63 y 0,88 GPa respectivamente, cuyos valores son coherentes con los reportados en este estudio, ya que son similares, siendo la Palma Real en la dirección radial la muestra que presenta un valor de dureza más bajo de 0,0813 GPa y un modulo de Young de 1,1452 y la Palma de lata con el número de dureza más alto de 0,2002 GPa y un módulo de Young de 3,1243 Gpa.

#### 4. CONCLUSIONES

- El módulo de Young y la dureza obtenidos a partir de los ensayos de indentación realizados presentan una fuerte dependencia con la carga de indentación. Por tanto, no se pueden determinar las propiedades mecánicas de los materiales ensayados a partir de un único experimento.
- La medición de la dureza en la madera se encuentra con un problema, debido a su heterogeneidad, anisotropía e higroscopia, que no se plantea en otros materiales como los metales, debido a que se tratan de cuerpos isótropos y homogéneos, es por esto que los datos pueden variar sustancialmente.
- En algunos casos se encuentra que la dureza disminuye con cargas muy pequeñas, pero es probablemente debido a la vibración que se vuelve cada vez más importante a medida que se reduce la carga, más generalmente hay un aumento en las cargas pequeñas, esto puede deberse al método de preparación de las muestras, ya que las capas superficiales pueden endurecerse mediante el proceso de pulido.
- Los valores de dureza obtenidos mediante el modelo convencional a partir de la diagonal de la huella, son similares a los valores obtenidos a partir del ensayo de indentación instrumentada para la gran mayoría de las muestras, obteniendo un coeficiente de correlación entre los métodos de aproximadamente 0.8.
- La técnica de indentación instrumentada es una gran herramienta para la medición de las propiedades mecánicas de materiales como la madera, en particular su dureza y módulo de elasticidad. Esta herramienta nos permitió encontrar distintas propiedades mecánicas mediante la curva de carga y descarga, la cual nos brindó información valiosa del comportamiento de los materiales en estudio y simplificó las pruebas para hallar diferentes propiedades, los valores de dureza obtenidos por este método fueron revisados a través de otras pruebas como la prueba de dureza Vickers, cuya toma de datos fue más compleja que el método de IIT, los valores obtenidos de las diferentes propiedades mecánicas fueron similares con las de otras maderas ya estudiadas

por diferentes autores, se evidenció la influencia de la carga y la dirección de aplicación de esta para obtener cada una de las propiedades mecánicas, además se observó la relación que existe entre las propiedades elásticas y la dureza. Esta relación nos permitió estimar un valor del límite elástico de cada una de las muestras, lo cual nos ayudó a entender mejor el comportamiento elástico de las especies en estudio.

- Debido a que la madera no es un material isótropo ni heterogéneo cuando se están realizando las pruebas de indentación se puede caer en un defecto lo que conlleva a un error en la medida de las propiedades mecánicas por lo que se recomienda cambiar el sitio de indentación cuando el error sea significativo.
- Se recomienda hacer estudios para conocer la manera como varían las propiedades mecánicas con el contenido de humedad para las especies estudiadas, ya que la presente investigación solo presenta los resultados a un valor de CH.

## REFERENCIAS

- [1] DE LA CALLE, José Carlos. Análisis comparativo de diferentes métodos para la determinación de dureza en maderas. Tesis de magíster en Ingeniería de montes. Palencia: Universidad de Valladolid. Escuela técnica superior de ingenierías agrarias, 2013, 84 p.
- [2] ROLÁN RICO, José María. Influencia de la humedad y densidad en la dureza como propiedad físico-mecánica de la madera. Tesis de magíster en Ingeniería de montes. Palencia: Universidad de Valladolid. Escuela técnica superior de ingenierías agrarias, 2014, 92 p.
- [3] KLÜPPEL, André. Hardness and indentation modulus of resin-treated wood. *International Wood Products Journal*, 2017. p. 4.
- [4] OLIVER, Warren; PHARR, George. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, Vol 7, p. 1564-1583.
- [5] OLIVER, Warren. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, Vol 19, p. 20.
- [6] ROA, Joan Josep. Determinación de las propiedades mecánicas y mecanismos de fractura de electrolitos soportados de YSZ y GDC mediante ensayos de indentación instrumentada. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*. 2010, Vol. 49, p. 35 -40.
- [7] PEREZ GALAZ, V. Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas. *Forestry Department FAO*. 1983, p. 15.
- [8] DOYLE, J; WALKER, C. Indentation hardness of wood. *Wood and fiber science*. 1985, Vol 17, p. 369-376.

- [9] BARLETTA, Massimiliano. Application of instrumented micro-indentations to 'in situ' mechanical characterization of wooden structures: Part I-Analysis of highly selected and decayed pinewood samples. *Journal of the International Measurement Confederation*. 2006. Vol 39, p. 274-284.
- [10] KLÜPPEL, André. Instrumented macrohardness testing of wood. *International Wood Products Journal*, 2016. p. 8.
- [11] TABOR, David. A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1948. Vol 192. p. 247-274.
- [12] HUTCHINGS, Ian. The contributions of David Tabor to the science of indentation hardness. *Journal of Materials Research*. 2009, Vol. 24, p. 581–589
- [13] TABOR, David. The hardness of solids. *Reviews of Physics in Technology*. 1970. Vol 1. p. 145-179.
- [14] BUCKLE, H; WESTBROOK, J. *Science of Hardness Testing and its Research Applications*. American society for metals. 1973. p. 10.
- [15] CHICOT, D; LESAGE, J. Absolute hardness of films and coatings. *Thin Solid Films*. 1995, Vol. 254, p. 123-130.
- [16] TOMAS, David. Microhardness measurement as a quality control technique for thin, hard coatings. *Surface Engineering*. 1987, Vol. 3, p. 117–122.
- [17] ICONTEC. MADERAS. Determinación del contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos. 206-1. p. 6, 2005.
- [18] ASTM. Standard Practice for Instrumented Indentation Testing. E-2546. 2015. p. 1-24.
- [19] ASTM. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. E-384. 2017. p. 1-40.

- [20] GUTIÉRREZ GONZÁLES, M. Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua *Angustifolia Kunth* Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua *Angustifolia Kunth*. Tesis de magíster en Ingeniería de estructuras. 2011. 151 p.
- [21] NASTIC, Aleksandra; MERATI, Ali; BIELAWSKI, Mariusz; BOLDUC, Manon; FAKOLUJO, Olanivi; NGANBE, Michel. Instrumented and Vickers Indentation for the Characterization of Stiffness, Hardness and Toughness of Zirconia Toughened Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC Armor. *Journal of Materials Research*. 2015, Vol. 31, p. 773–783.
- [22] SUBYAKTO, S. Variation in specific gravity and bending properties of *Dendrocalamus asper* culm grown in Bogor. *Proceedings of the Vth International Bamboo Workshop and the IV International Bamboo*. 1995, p. 185-192.
- [23] DUANJIE, Li. Wood Hardness & Elastic Modulus Using Microindentation. *NANOVEA*. 2015, p. 7.

## BIBLIOGRAFIA

ASTM. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. E-384. 2017. p. 1-40.

ASTM. Standard Practice for Instrumented Indentation Testing. E-2546. 2015. p. 1-24.

BARLETTA, Massimiliano. Application of instrumented micro-indentations to 'in situ' mechanical characterization of wooden structures: Part I-Analysis of highly selected and decayed pinewood samples. Journal of the International Measurement Confederation. 2006. Vol 39, p. 274-284.

BUCKLE, H; WESTBROOK, J. Science of Hardness Testing and its Research Applications. American society for metals. 1973. p. 10.

CHICOT, D; LESAGE, J. Absolute hardness of films and coatings. Thin Solid Films. 1995, Vol. 254, p. 123-130.

de fractura de electrolitos soportados de YSZ y GDC mediante ensayos de indentación instrumentada. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio. 2010, Vol. 49, p. 35 -40.

DE LA CALLE, José Carlos. Análisis comparativo de diferentes métodos para la determinación de dureza en maderas. Tesis de magíster en Ingeniería de montes. Palencia: Universidad de Valladolid. Escuela técnica superior de ingenierías agrarias, 2013, 84 p.

DOYLE, J; WALKER, C. Indentation hardness of wood. Wood and fiber science. 1985, Vol 17, p. 369-376.

DUANJIE, Li. Wood Hardness & Elastic Modulus Using Microindentation. NANOVEA. 2015, p. 7.

GUTIÉRREZ GONZÁLES, M. Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua *Angustifolia Kunth* Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua *Angustifolia Kunth*. Tesis de magíster en Ingeniería de estructuras. 2011. 151 p.

HUTCHINGS, Ian. The contributions of David Tabor to the science of indentation hardness. *Journal of Materials Research*. 2009, Vol. 24, p. 581–589

ICONTEC. MADERAS. Determinación del contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos. 206-1. p. 6, 2005.

KLÜPPEL, André. Hardness and indentation modulus of resin-treated wood. *International Wood Products Journal*, 2017. p. 4.

KLÜPPEL, André. Instrumented macrohardness testing of wood. *International Wood Products Journal*, 2016. p. 8.

NASTIC, Aleksandra; MERATI, Ali; BIELAWSKI, Mariusz; BOLDUC, Manon; FAKOLUJO, Olanivi; NGANBE, Michel. Instrumented and Vickers Indentation for the Characterization of Stiffness, Hardness and Toughness of Zirconia Toughened Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiC Armor. *Journal of Materials Research*. 2015, Vol. 31, p. 773–783.

OLIVER, Warren. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation : Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, Vol 19, p. 20.

OLIVER, Warren; PHARR, George. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, Vol 7, p. 1564-1583.

PEREZ GALAZ, V. Manual de propiedades físicas y mecánicas de maderas chilenas. *Forestry Department FAO*. 1983, p. 15.

ROA, Joan Josep. Determinación de las propiedades mecánicas y mecanismos

ROLÁN RICO, José María. Influencia de la humedad y densidad en la dureza como propiedad físico-mecánica de la madera. Tesis de magíster en Ingeniería de montes. Palencia: Universidad de Valladolid. Escuela técnica superior de ingenierías agrarias, 2014, 92 p.

SUBYAKTO, S. Variation in specific gravity and bending properties of *Dendrocalamus asper* culm grown in Bogor. Proceedings of the Vth International Bamboo Workshop and the IV International Bamboo. 1995, p. 185-192.

TABOR, David. A Simple Theory of Static and Dynamic Hardness. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1948. Vol 192. p. 247-274.

TABOR, David. The hardness of solids. Reviews of Physics in Technology. 1970. Vol 1. p. 145-179.

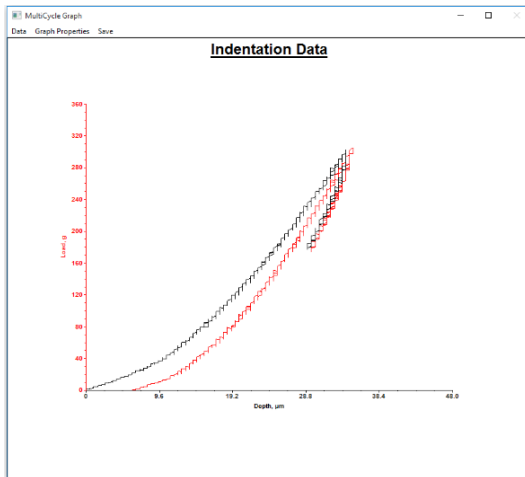
TOMAS, David. Microhardness measurement as a quality control technique for thin, hard coatings. Surface Engineering. 1987, Vol. 3, p. 117–122.

## ANEXOS

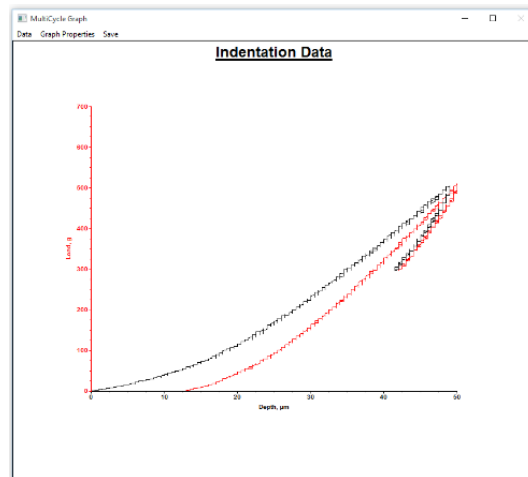
Anexo A. Curvas P-h arrojadas por el TriboLab Viewer software de todas las muestras de madera para cada carga.

- Coco

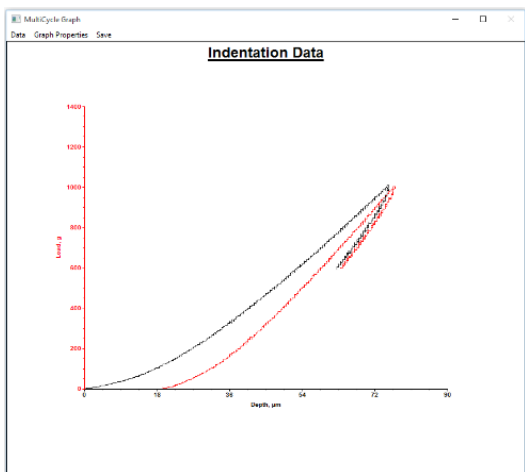
Dirección axial a 300 gf



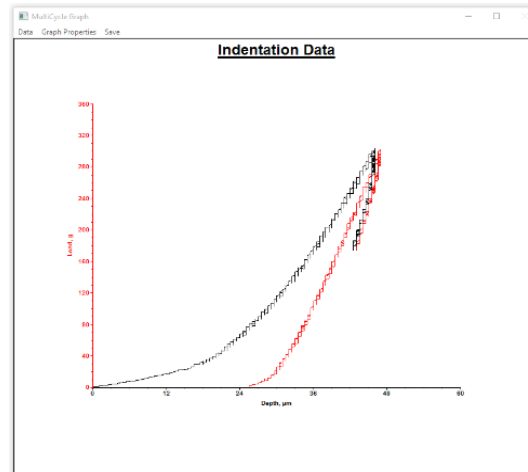
Dirección axial a 500 gf



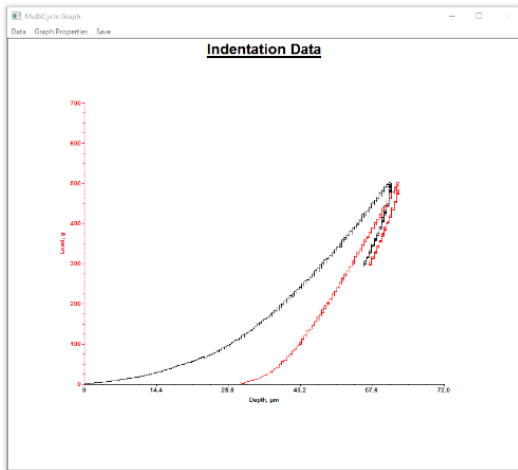
Dirección axial a 1000 gf



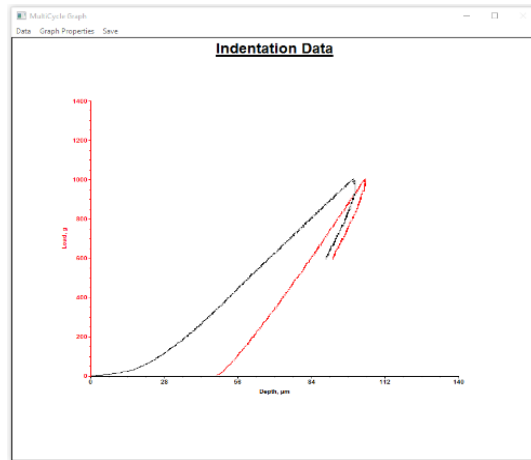
Dirección radial a 300 gf



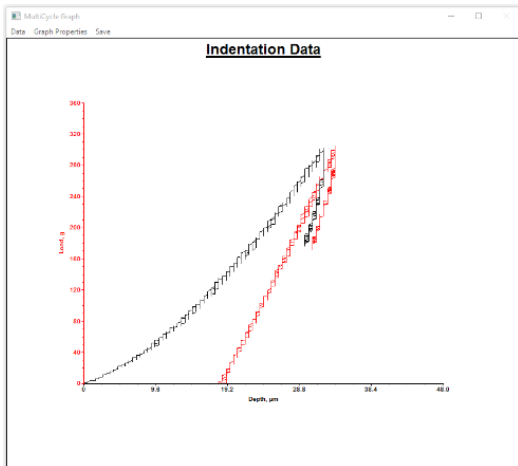
Dirección radial a 500 gf



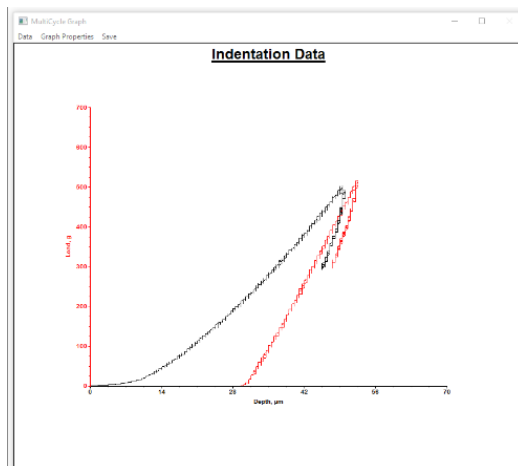
Dirección radial a 1000 gf



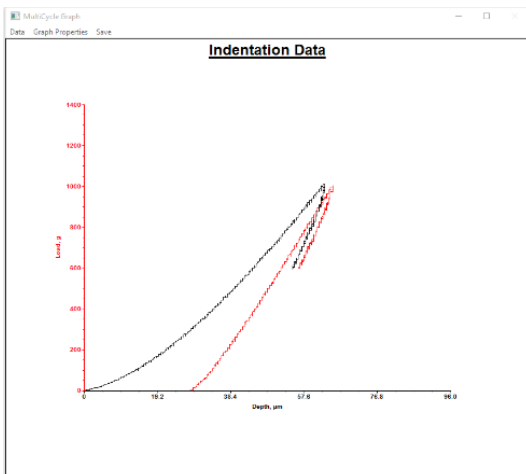
Dirección transversal a 300 gf



Dirección transversal a 500 gf

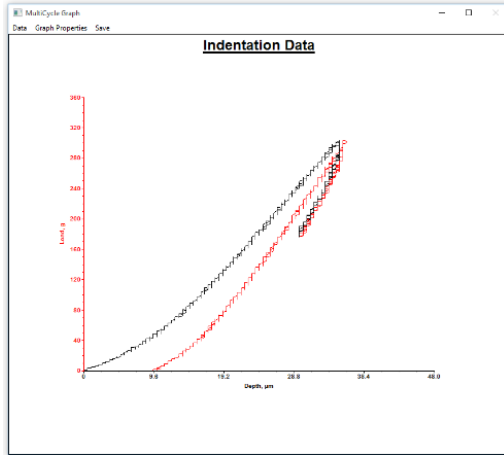


dirección transversal a 1000 gf

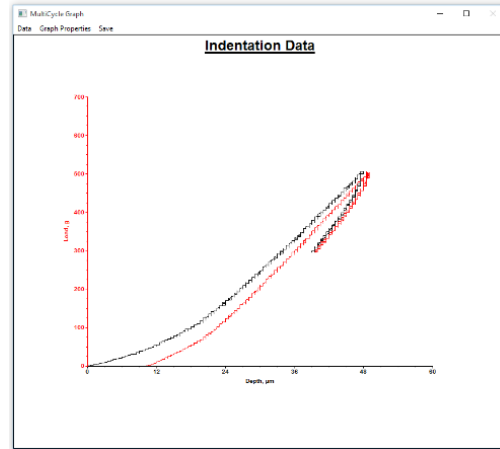


- Macadamia

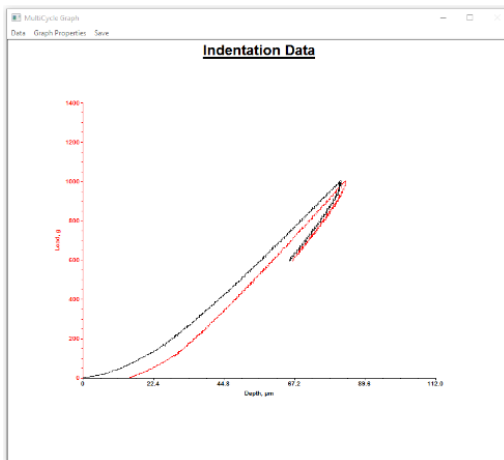
Dirección axial a 300 gf



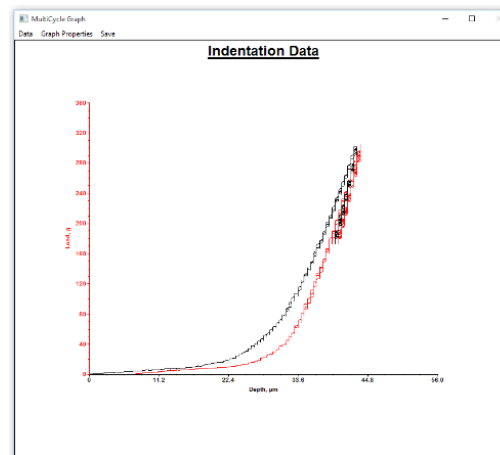
Dirección axial a 500 gf



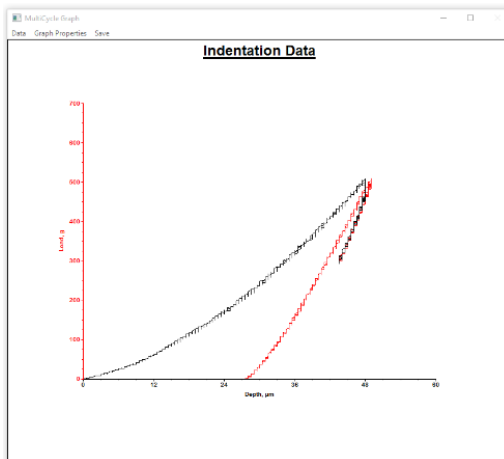
Dirección axial a 1000 gf



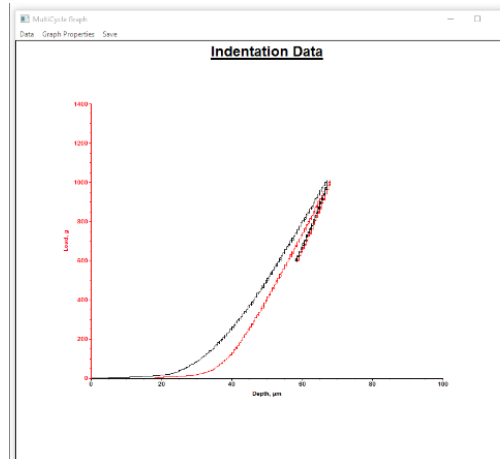
Dirección radial a 300 gf



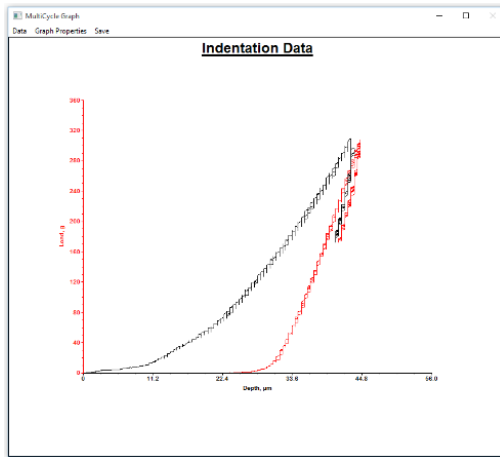
dirección radial a 500 gf



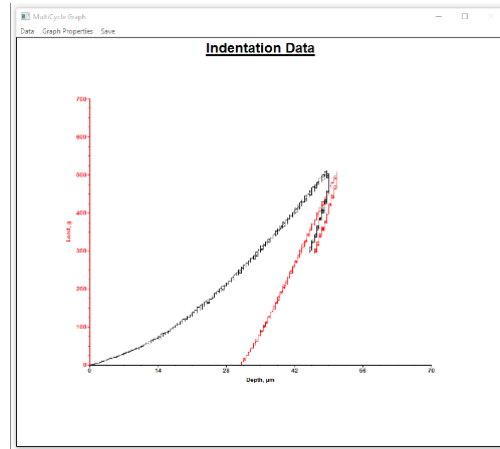
dirección radial a 1000 gf



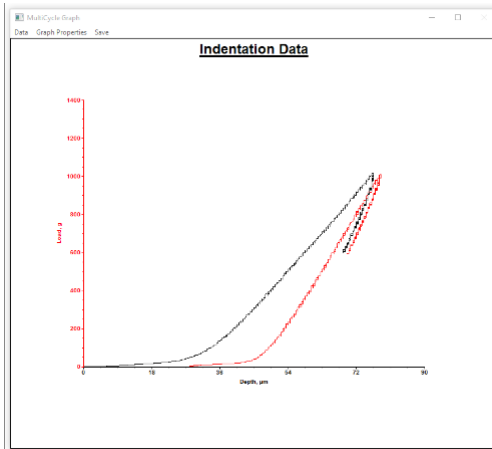
Dirección transversal a 300 gf



Dirección transversal a 500 gf

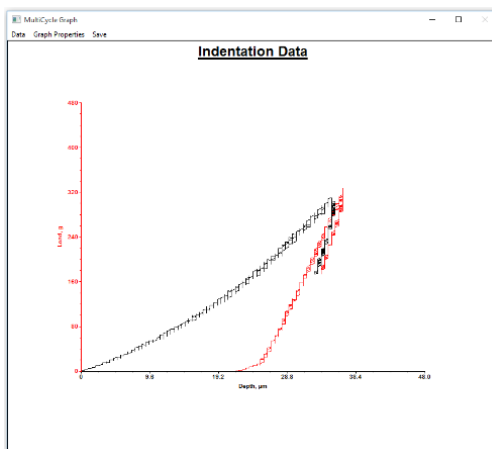


Dirección transversal a 1000 gf

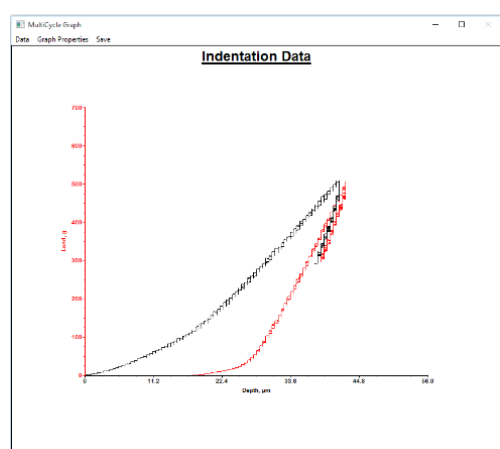


- Palma de Lata

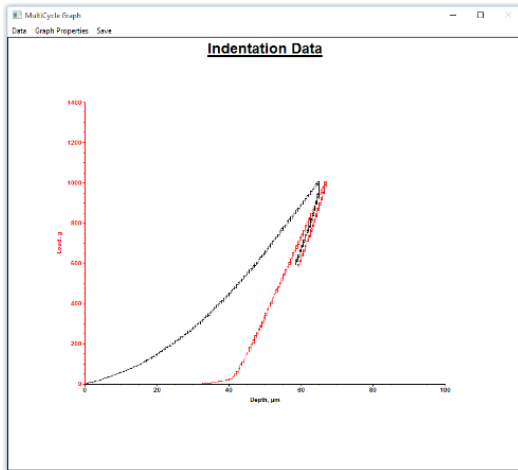
Dirección axial a 300 gf



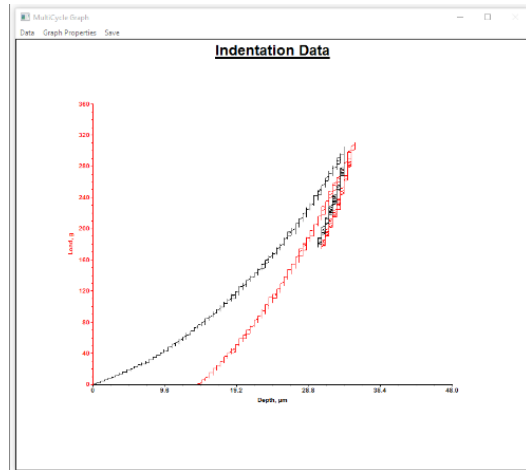
Dirección axial a 500 gf



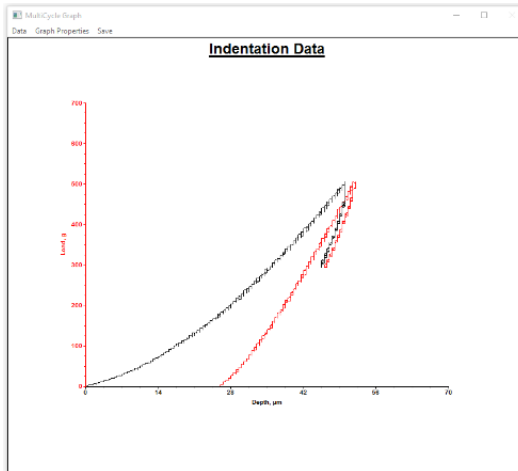
Dirección axial a 1000 gf



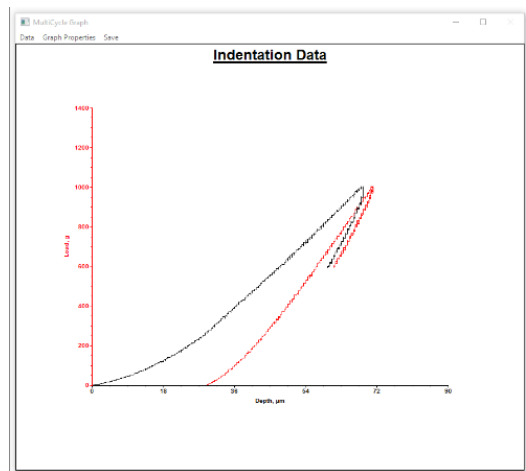
Dirección radial a 300 gf



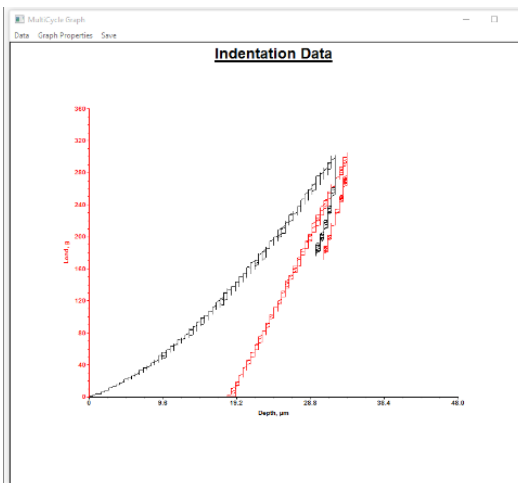
Dirección radial a 500 gf



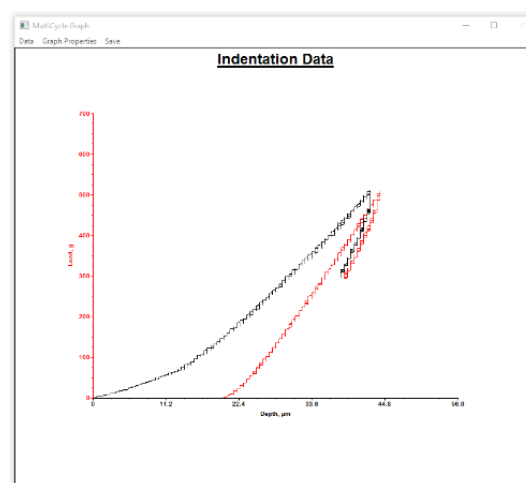
Dirección radial a 1000 gf



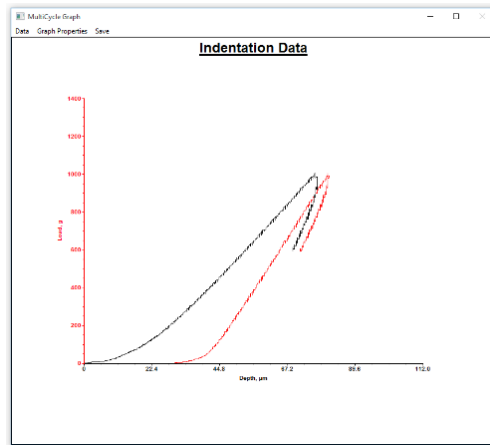
Dirección transversal a 300 gf



Dirección transversal a 500 gf

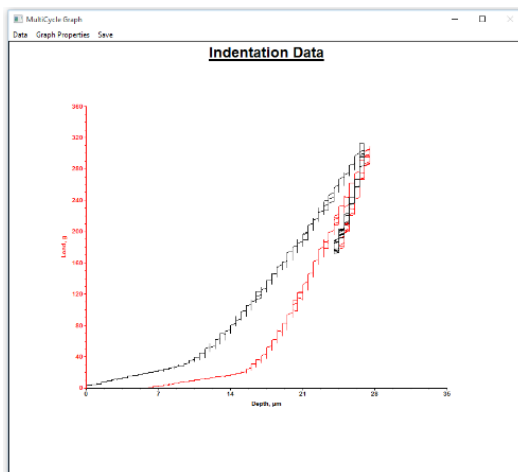


## Dirección transversal a 1000 gf

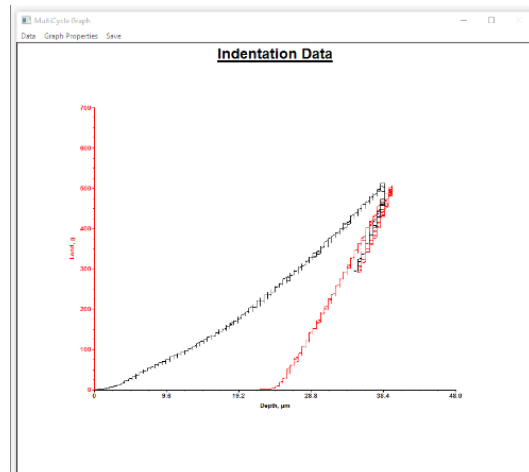


- Palma Real

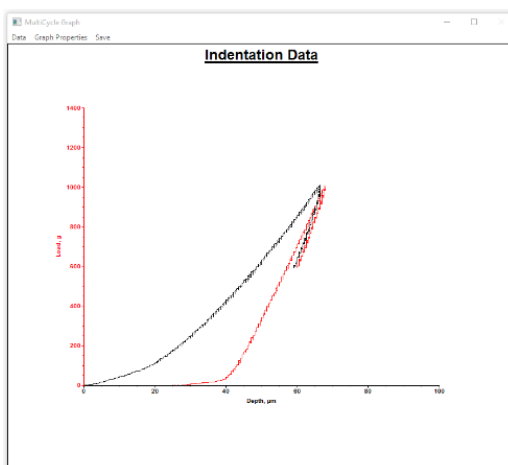
## Dirección axial a 300 gf



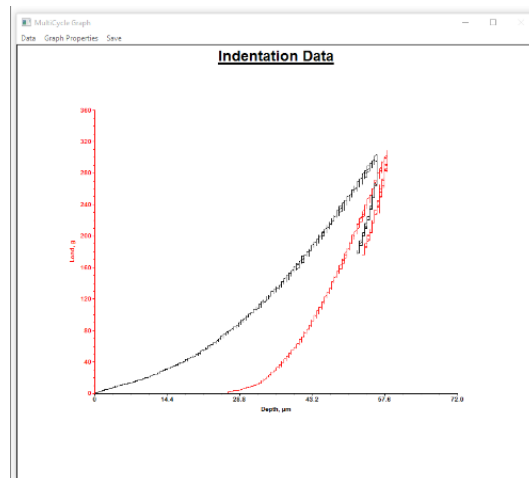
## Dirección axial a 500 gf



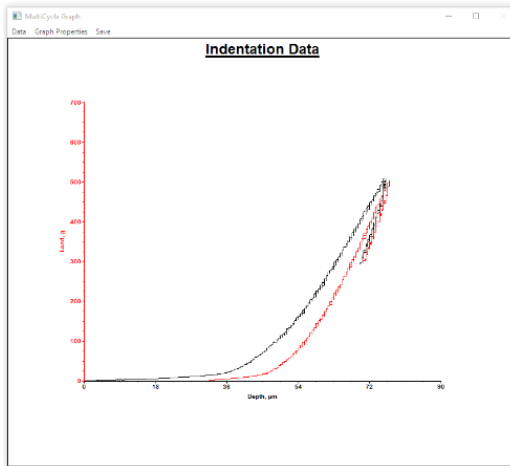
## Dirección axial a 1000 gf



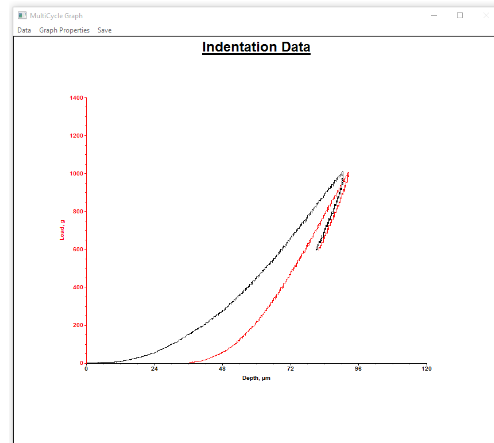
## Dirección radial a 300 gf



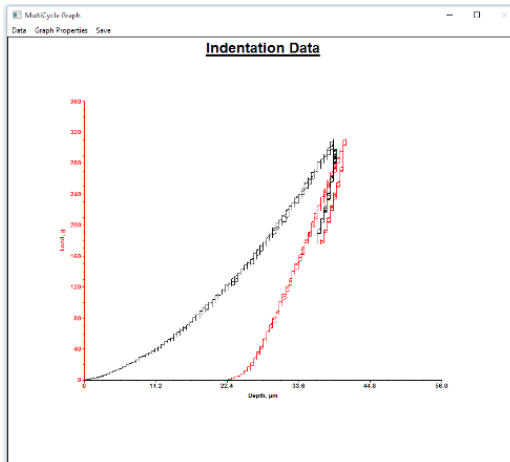
Dirección radial a 500 gf



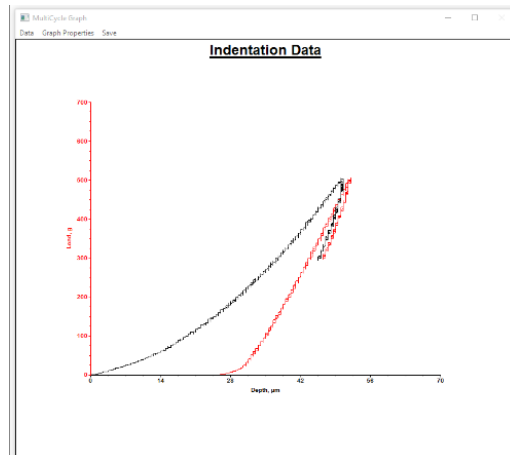
Dirección radial a 1000 gf



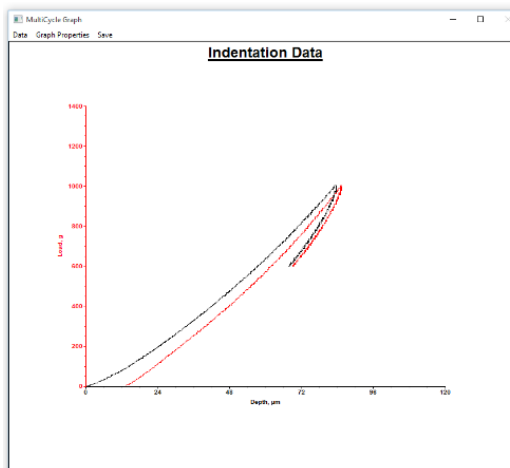
Dirección transversal a 300 gf



Dirección transversal a 500 gf



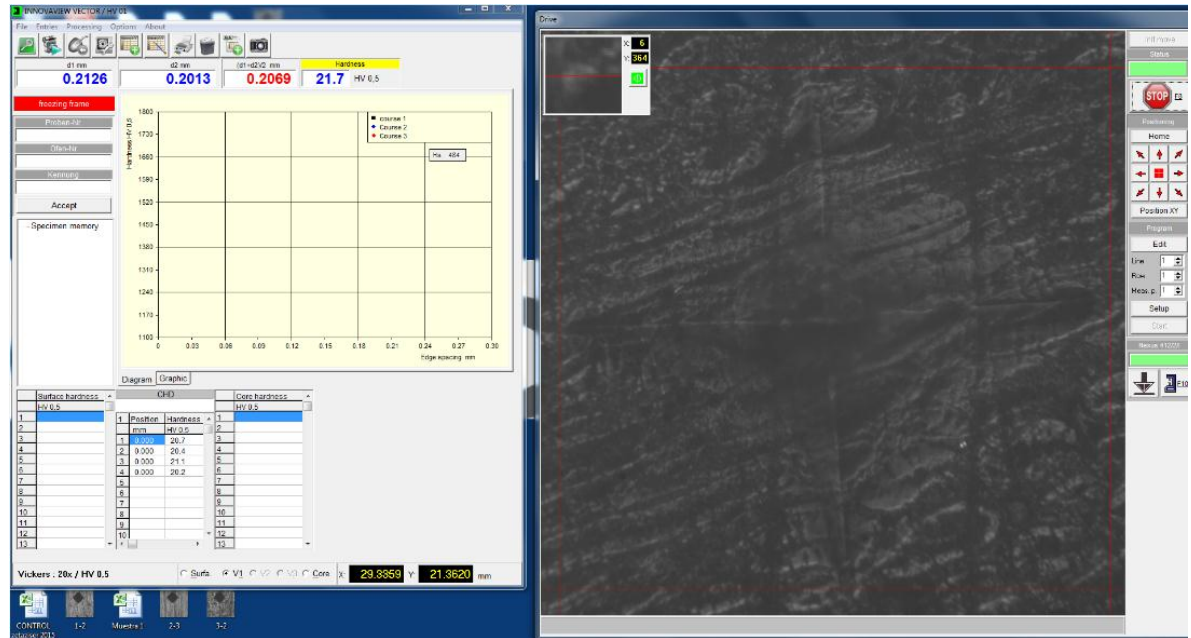
Dirección transversal a 1000 gf



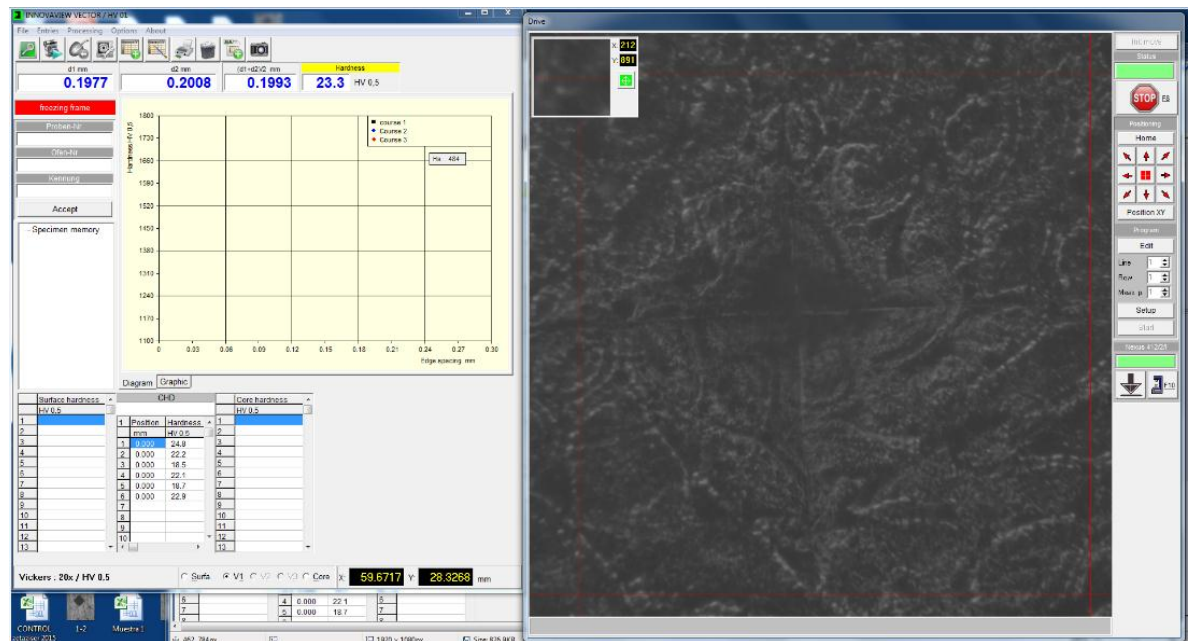
## Anexo B. Huella de indentación Vickers de las muestras de madera.

- Coco

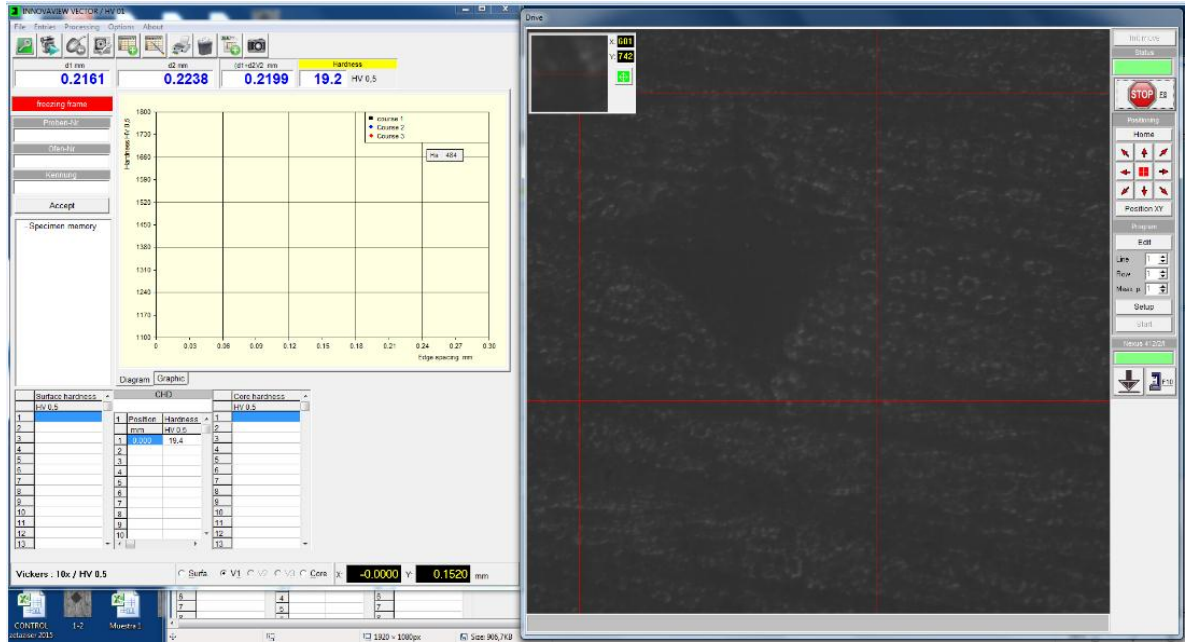
### Axial



### Radial

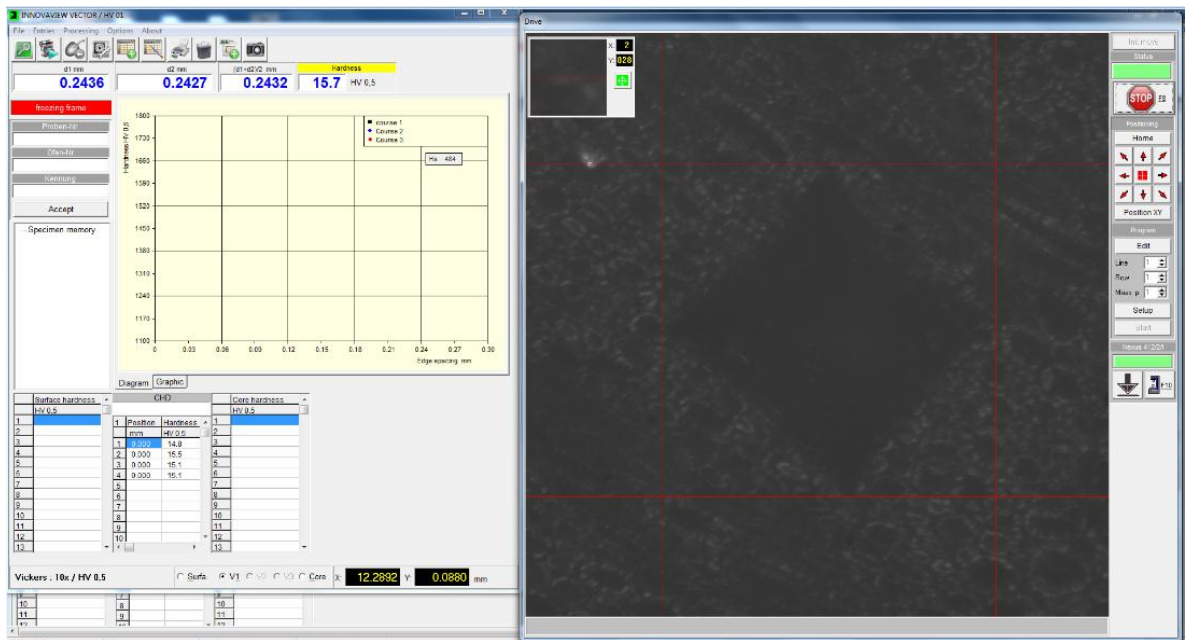


# Transversal



- Macadamia

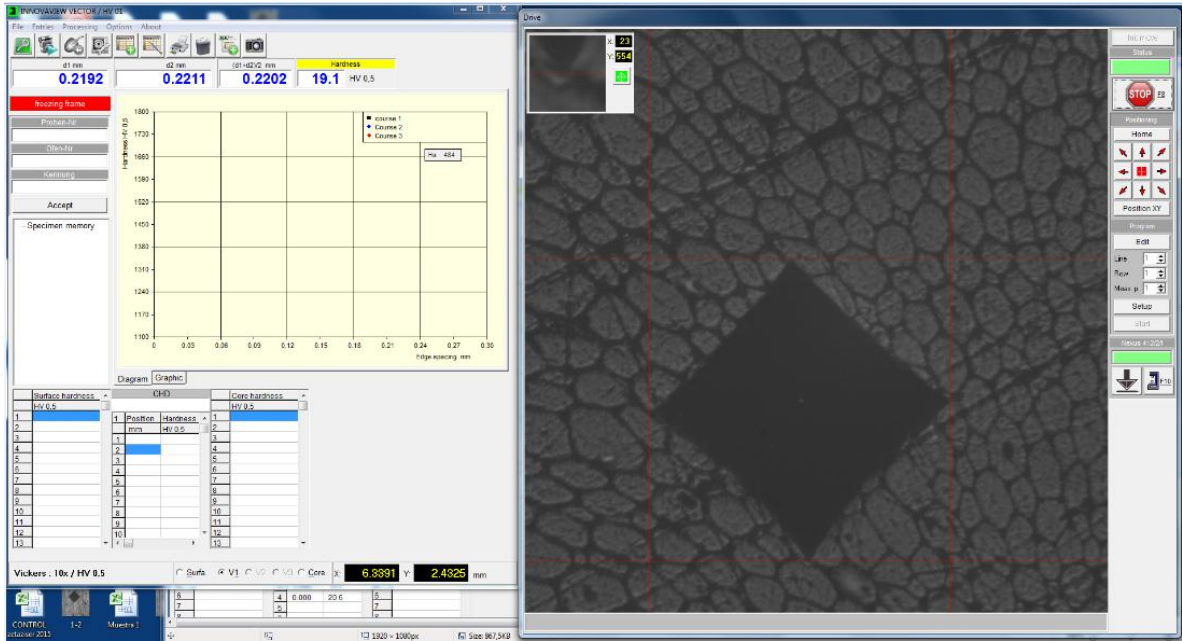
# Axial



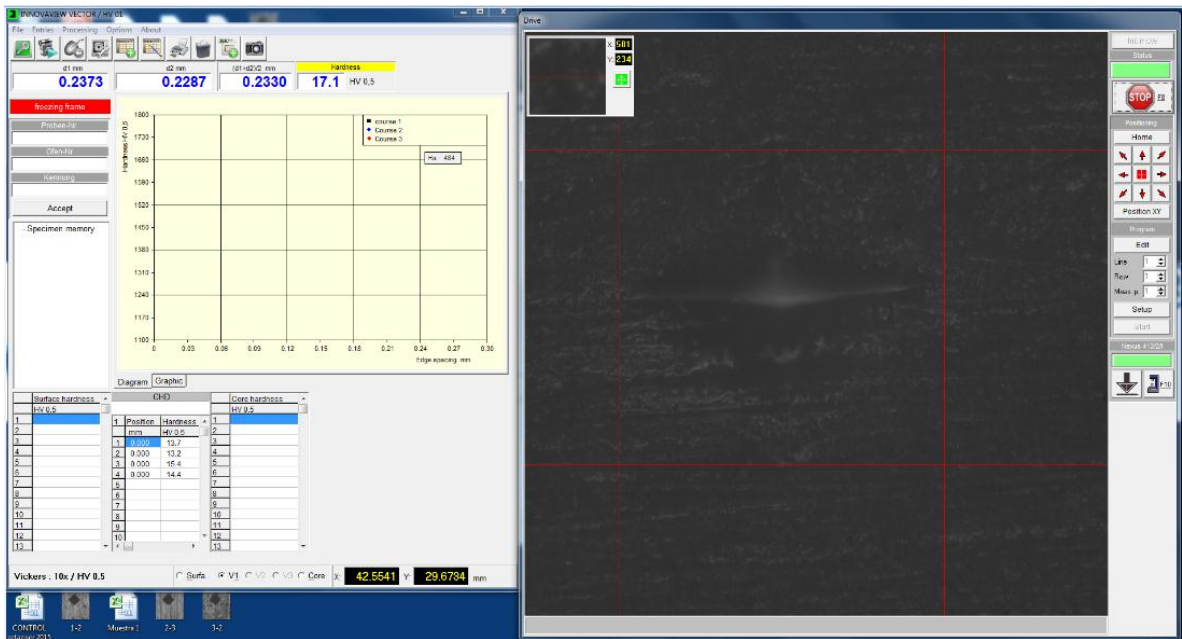


- Palma de Lata

### Axial

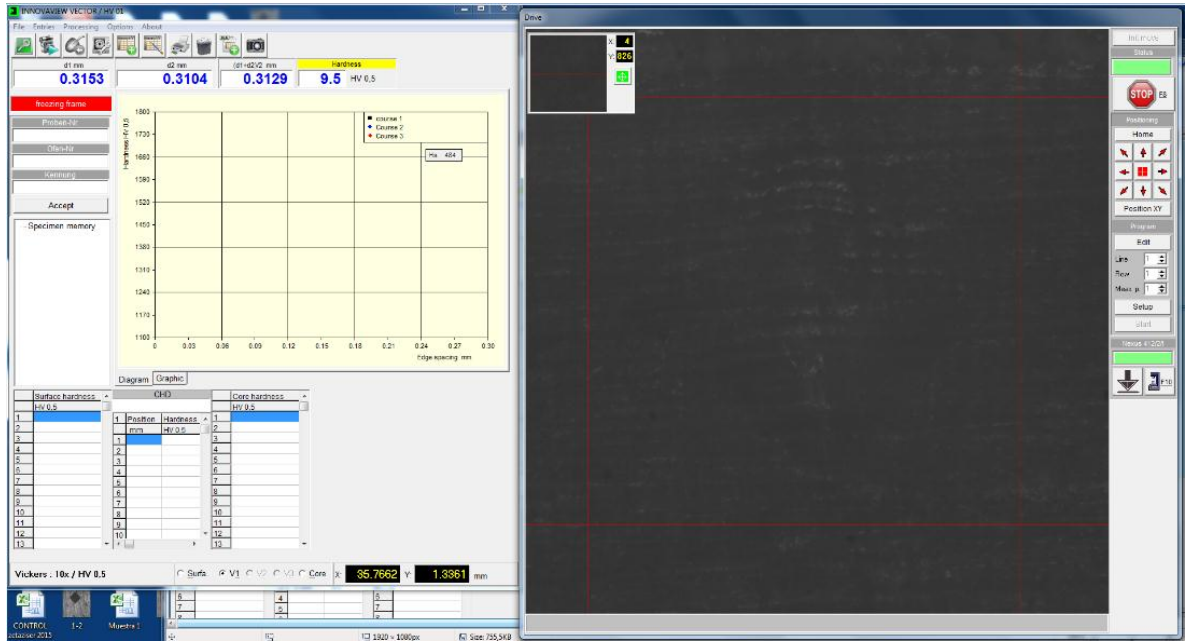


### Radial





## Radial



## Transversal

