UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍA DE LA MADERA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Tesis

Para obtener el título de

Maestro en Ciencias y Tecnología de la Madera

Estudio microestructural de la madera mediante tomografías de rayos-X

Presenta:

Juan Gabriel Rivera Ramos

Directores de Tesis:

Dr. Raúl Espinoza Herrera

Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete

Morelia, Michoacán

Agosto del 2018

RESUMEN

La madera de plantaciones forestales encaminada a proveer un abastecimiento sostenido de materia prima es primordial para la industria maderera en México. Las empresas celulósicas o de tableros para la construcción han establecido cultivos con especies de latifoliadas, despertando el interés por su utilización como madera sólida. Sin embargo, la madera de árboles jóvenes provenientes de plantaciones de rápido crecimiento presenta propiedades tecnológicas de menor calidad y se desconoce del todo el control adecuado de estas maderas que le permitan formar parte de la madera en escuadría para abastecimiento. Esta tesis analiza las características geométricas de la microestructura en 3D de dos especies latifoliadas procedentes de plantaciones forestales, utilizando para ello la microtomografía de rayos- X en distinta resolución para cada una, a fin de conocer posibles causas de la baja calidad. Así mismo se analizan los cambios en la microestructura antes y después de un termotratamiento en iguales coordenadas de la probeta. El *Eucalyptus nitens* Maiden, mostró que las células del parénquima radial se encuentran cubiertas por una sustancia envolvente que se extiende entremedio de la pared tangencial de las fibras, identificada como abultamiento tangencial parenquimatoso en fibras (ATPF), la cual observó indicios de interferir en esfuerzos transversos en el tejido. Así mismo, se evaluó la deformación y permeabilidad del tejido, mostrando deformaciones y agrietamiento en la pared de las fibras y microzonas con porosidad confinada de más difícil acceso a la permeabilidad. Los análisis a la madera de *Acacia mangium* Willd mostraron que, después del termotratamiento, la madera presenta degradación acentuada en la pared tangencial de las fibras, sobre la sustancia identificada como ATPF. También se observó una ligera compactación de la pared de la fibra, mayormente en cara radial, y una contracción del tejido con una porosidad más reducida, sobre todo en las fibras, ya que los vasos, a diferencia del resto del tejido, permanecieron sin reducción ni deformación, manteniendo su capacidad permeable.

Se concluye: La técnica de microtomografia de rayos-X complementa sólidamente los estudios a las microestructuras de la madera. La madera de *Eucalyptus nitens* presentó características que afectan su calidad. Los cambios por termotratamiento en la madera de *Acacia mangium* tienen relación con la degradación del ATPF en su pared celular.

Palabras clave TC rayos-X en madera, Microestructura de madera, Permeabilidad en madera

ABSTRACT

The wood from forest plantations aimed at providing a sustainable supply of raw material is essential for the timber industry in Mexico. The cellulose companies or of boards for the construction have established crops with hardwood species, awakening the interest for their use as solid wood. However, the wood of young trees from fast-growing plantations has lower-quality technological properties and the adequate control of these woods is not completely known, which allows them to be part of the timber and lumber supplying. This thesis analyzes the geometric characteristics of the 3D microstructure of two hardwoods species from forest plantations, using the X-ray microtomography in different resolutions for each one, in order to know the possible causes of the low quality. In addition, with this same technique, the changes in the same microstructure are analyzed before and after a heat treatment in the same coordinates of the test tube. The analysis of the geometrical characteristics in the microstructure of the *Eucalyptus nitens* Maiden, showed that the cells of the radial parenchyma are covered by an enveloping substance that extends between the tangential wall of the fibers, identified as a parenchymal tangential bulge in fibers (PTB), which observed indications of interfering in transverse efforts in the woody woven. Likewise, the deformation and permeability of the woody woven was evaluated, showing deformations and cracking in the wall of the fibers and microzones with confined porosity of more difficult access to permeability.

Analyzes on the wood of *Acacia mangium* Willd showed that, after heat treatment, the wood presents marked degradation in the tangential wall of the fibers, on the substance identified as PTB. A slight compaction of the fiber wall was also observed, mainly in the radial face, and a contraction of the woody woven with a reduced porosity, especially in the fibers, since the vessels, unlike the rest of the woody woven, remained without reduction or deformation, maintaining its permeable capacity.

It is concluded: The technique of X-ray microtomography solidly complements the studies to the microstructures of wood. The wood of *Eucalyptus nitens* presented characteristics that affect its quality.The heat treatment changes in *Acacia mangium* wood are related to the degradation of PTB in its cell wall.

Key Words TC X-ray of wood, microstructures of wood, permeability of wood.

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por haber otorgado el apoyo a la realización de los estudios de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y, con ello, a la realización de esta tesis, a través de la beca de manutención y servicio médico, con número 605487 del periodo 01 de septiembre de 2016 hasta el 28 de febrero de 2018.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y a la Comisión de Becas del H. Consejo Universitario, por haber otorgado el apoyo a la realización de los estudios de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera y con ello a la realización de la presente tesis, a través de la beca universitaria de la UMSNH ciclo escolar 2015 – 2016, del periodo comprendido entre 01 de marzo de 2016 hasta el 30 de agosto de 2016.

Al Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X – LUMIR, Centro de Geociencias UNAM, que a través de su infraestructura permitieron la realización del presente trabajo de investigación.

A la Facultad de Ingenieria en Tecnología de la madera de la UMSNH, por la contribución de sus académicos y la infraestructura en su plantel, para con esta tesis.

Al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra INICIT de la UMSNH, por la contribución de sus académicos y la infraestructura en su plantel, para con esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sentido agradecimiento a mi querida y valiente esposa, por su dedicación, comprensión y paciencia, que facilitaron la realización de este trabajo de investigación y el logro del grado académico.

Agradezco públicamente a mis directores de tesis, el Doctor Luis Rafael Olmos Navarrete y el Doctor Raúl Espinoza Herrera, por compartirme sus conocimientos en Tomografía Computarizada de rayos-X y permitir de esta manera la especialización de mi maestría.

A los profesores y al personal administrativo de esta máxima casa de estudios, por su intervención en mi proceso de titulación.

ÍNDICE

RESUMEN I

ABSTRACT II

RECONOCIMIENTOS III

AGRADECIMIENTOS IV

ÍNDICE V

ÍNDICE DE FIGURAS VIII

ÍNDICE DE CUADROS XII

1 INTRODUCCIÓN 1

2. ANTECEDENTES 2

2.1 Microestructura de la madera 2

2.1.1 Microestructura del *Eucalyptus nitens* 2

2.1.2 Microestructura de *Acacia mangium* 3

2.1.3 Función estructural del tejido leñoso 3

2.2 Madera termotratada 3

2.2.1 Microestructura de madera termotratada 4

2.2.2 Propiedades de madera termotratada 4

2.3 Técnica de tomografía computarizada de rayos-X 4

2.3.1 Principios de la tomografía computarizada 5

2.3.2 Inspección de madera con tomografía de rayos-X 7

2.4 Tratamiento de imágenes 7

2.4.1 Filtros 8

2.4.2 Segmentación 8

2.4.3 Transformación geométrica 9

2.4.4 Transformación morfológica 9

2.4.5 Descriptores de región y frontera 9

2.5 Permeabilidad 10

2.5.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD) 10

2.5.2 Tortuosidad 11

3 JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 12

3.1 Justificación 12

3.2 Hipótesis 12

3.3 Objetivo General 12

3.3.1 Objetivos especifícos 12

4 ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE LA MICROESTRUCTURA DE *Eucalyptus Nitens* MEDIANTE IMÁGENES DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X Y SIMULACIÓN DE FLUJO CFD 14

4.1 Resumen 14

4.2 Introducción 14

4.3 Materiales y Métodos 16

4.3.1 Preparación de las muestras 16

4.3.2 Adquisición de imágenes 18

4.3.2.1 Tomografia computarizada 18

4.3.2.2 Software utilizado 19

4.3.2.3 Tipo de imágen 20

4.3.3 Tratamiento de imágenes 20

4.3.3.1 Filtración 21

4.3.3.2 Brillo y contraste 22

4.3.3.3 Segmentación 22

4.3.3.4 Niveles de brillo 23

4.3.3.5 Caracterización geometrica 23

4.3.4 Simulaciones de flujo 26

4.3.4.1 Método de simulación 26

4.4 RESULTADOS Y DISCUCIÓN 27

4.4.1 Identificación cualitativa anatómica 27

4.4.2 Caracterización geométrica-microestructural 42

4.5 Conclusiones 60

5 ESTUDIO DE CAMBIOS MICROESTRUCTURALES EN LA MADERA DE *Acacia mangium* MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RAYOS-X DEBIDO A TERMOTRATAMIENTO 62

5.1 Resumen 62

5.2 Introducción 62

5.3 Materiales y métodos 64

5.3.1 Preparación de las muestras 64

5.3.2 Métodos 65
5.3.2.1 Adquisición de datos 65
5.3.2.2 Tratamiento de imágenes 66
5.3.2.3 Caracterizacón geomeetrica 67
5.3.2.4 Simulaciones de flujo 68
5.4 RESULTADOS Y DISCUCIÓN 69
5.4.1 Identificación cualitativa anatómica 69
5.4.2 Caracterización geométrica-microestructural 78
5.5 CONCLUSIONES 98
6. CONCLUSIONES GENERALES 100
7. REFERENCIAS 102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Probetas de *Eucalyptus nitens* Maiden. **17**

Figura 4.2. Tomógrafo Xradia Zeiss Versa 510 ..... **19**

Figura 4.3. Posición de los cortes virtuales en la imagen inicial de 976 x 1015 x 988 pixeles. **20**

Figura. 4.4. Tratamiento de imágenes con ImageJ **21**

Figura.4. 5. Rendering 3D en sofware ImageJ de madera de *Eucalyptus nitens* **23**

Figura 4.6. Reconstrucción tridimensional con imagen de µTC de rayos-X de la microestructura celular de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. **28**

Figura 4.7. µTC-rayos X de sección transversal de madera *Eucalyptus nitens* Maiden **30**

Figure 4.8. µTC-rayos X de sección tangencial de madera *Eucalyptus nitens* Maiden **32**

Figura 4.9. µTC-rayos X de sección radial de madera *Eucalyptus nitens* Maiden **35**

Figura 4.10. Imágenes de la relación de ATPF con los radios medulares de madera *Eucalyptus nitens* Maiden..... **37**

Figura 4.11. Imágenes de conectividad 3D fase porosa de madera *Eucalyptus nitens* Maiden **38**

Figura 4.12. Binarizacion de imágenes de *Ecalyptus nitens*. **40**

Figura 4.13. Imágenes binarias de madera *Eucalyptus nitens* obtenidas con µTC rayos-X ... **41**

Figura 4.14. Trazados de nivel de brillo en corte transversal de *Eucalyptus nitens* Maiden. . **43**

Figura 4.15. Trazados de nivel de brillo en corte transversal de *Eucalyptus nitens* Maiden. . **44**

Figura 4.16. Distribución de espesor de pared celular en imágenes µTC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. **45**

Figura 4.17. Distribución de área en poro de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden **46**

Figura 418. Distribución de circularidad en poro de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. **47**

Figura 4.19. Distribución de solidez en pared de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. **48**

Figura 4.20. Distribución de diámetro de Feret en poro de fibra, en imágenes TC rayos-X

de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. **49**
Figura 4.21. Distribución de diámetro mínimo de Feret en poro de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. **49**
Figura 4.22. Distribución de área en poro de puntuación de fibra (a, b, c) y de diámetro mínimo de Feret de poro en puntuación, de fibra (e, f, g), en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección radial. **51**
Figura 4.23. Distribución de área en poro de puntuación de fibra (a, b, c) y de diámetro mínimo de Feret de poro en puntuación, de fibra (e, f, g), en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección tangencial.. ..... **52**
Figura 4.24. Simulación de permeabilidad CFD de madera *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección T= dirección tangencial. **58**
Figura 4.25. Simulación de permeabilidad CFD de madera *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección R= dirección radial **59**
Figura 4.26. Simulación de permeabilidad CFD de madera *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección L= dirección longitudinal **60**
Figura 5.1. Probetas de *Acacia mangium* Willd. **64**
Figura 5.2. Imagen inicial de *Acacia mangium* de 992 x 994 x 1014 pixeles. **66**
Figura 5.3. Imagen binaria de madera de *Acacia mangium*. **67**
Figura 5.4. Imágen de TC rayos-X reconstrucción 3D con tabla LUT de madera *Acacia mangium* Willd. **70**
Figura 5.5. Imagen de TC-rayos X de fibras con desplazamiento tangencial en madera de *Acacia mangium* Willd. **71**
Figura 5.6. Degradación de pared en imágenes de TC rayos-X en secciones virtuales de madera *Acacia mangium* Willd. **72**
Figura 5.7. Reconstrucción 3D de fibras de madera *Acacia mangium* Willd. **73**
Figura 5.8. Acercamiento en imágenes de TC rayos-X de secciones virtuales de madera *Acacia mangium* Willd. **74**
Figura 5.9. Imagen TC de incrustaciones de prismaticos en madera *Acacia mangium* Willd. **75**
Figura 5.10. Imágenes TC de lumen en vasos de madera *Acacia mangium* Willd. **76**
Figura 5.11. Imágenes TC de lumen en fibra de madera *Acacia mangium* Willd. **77**
Figura 5.12. Imágenes TC de lumen en rayos de madera *Acacia mangium* Willd. **77**

Figura 5.13. Imagen de TC rayos-X de secciones virtuales de madera *Acacia mangium* Willd. **79**
Figura 5.14. Histograma de nivel de brillo en volumen de imagen TC rayos-X de madera *Acacia mangium* Willd. **79**
Figura 5.15. Histograma de nivel de brillo, en volumen (eje z) de imagen TC-rayos X de madera *Acacia mangium* Willd sin vasos. **80**
Figura 5.16. Histogramas de nivel de brillo lineal en imágenes TC de madera *Acacia mangium* Willd. **82**
Figura 5.17. Histogramas de nivel de brillo lineal en imágenes TC de madera *Acacia mangium* Willd. **83**
Figura 5.18. Histograma de frecuencia de área de poro en fibra de *Acacia mangium* Willd ST= Sin termotratamiento. **84**
Figura 5.19. Histograma de frecuencia de diámetro mínimo de Feret de poro en fibra de *Acacia mangium* Willd. **85**
Figura 5.20. Histograma de frecuencia de circularidad de poro en fibra de *Acacia mangium* Willd. **86**
Figura 5.21. Histograma de frecuencia de circularidad de poro en fibra de *Acacia mangium* Willd. **86**
Figura 5.22. Histograma de frecuencia de solidez de pared en fibra de *Acacia mangium* Willd. **87**
Figura 5.23. Histograma de frecuencia de solidez de pared en fibra de *Acacia mangium* Willd. **87**
Figura 5.24. Histograma de frecuencia de área de poro en vaso de *Acacia mangium* Willd. . **88**
Figura 5.25. Histograma de frecuencia de diámetro mínimo de Feret de poro en vaso de *Acacia mangium* Willd. **89**
Figura 5.26. Histograma de frecuencia de circularidad de poro en vaso de *Acacia mangium* Willd. **89**
Figura 5.27. Histograma de frecuencia de solidez de pared en vaso de *Acacia mangium*

Willd. **90**

Figura 5.28. Histograma de frecuencia de solidez de pared en vaso de *Acacia mangium* Willd. **90**

Figura 5.29. Histograma de frecuencia de espesor de pared en fibra de *Acacia mangium* Willd. **91**

Figura 5.30.; Simulación de permeabilidad CFD en Imágenes de TC-rayos X de madera de *Acacia mangium* Willd. **97**

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1 Dimensión de probetas de madera y objeto de estudio para imágenes TC rayos-X **17**

Cuadro 4.2. Caracterización geométrica de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden en imágenes TC rayos-X **56**

Cuadro 4.3. Caracterización geométrica de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden en imágenes TC rayos-X. **57**

Cuadro 5.1. Dimensión de probetas de madera y objeto de estudio para imágenes TC rayos-X **65**

Cuadro 5.2. Nivel de brillo en imágenes TC rayos-X de madera de *Acacia mangium* Willd. **94**

Cuadro 5.3. Caracterización geométrica de madera de *Acacia mangium* Willd en imágenes TC rayos-X **94**

Cuadro 5.4. Caracterización geométrica de madera de *Acacia mangium* Willd en imágenes TC rayos-X **95**

Cuadro 5.5. Caracterización geométrica de madera de *Acacia mangium* Willd en imágenes TC rayos-X **95**

1 INTRODUCCIÓN

El análisis de imágenes para caracterizar distintos materiales y realizar diagnósticos en base a observaciones tridimensionales es una actividad que se ha incrementado en los últimos años. Esto ha sido posible gracias al desarrollo de la tomografía computarizada (TC), un método alternativo de inspección no destructiva en estructuras 3D a través de rayos-X, en él se obtienen datos cuantitativos de un volumen analizado y es posible además separar virtualmente las fases de la matriz o seccionarla para obtener información selectiva (Maire *et al*. 2001; Steppe *et al*. 2004; Mayo *et al*. 2010; Rojas y Ortiz, 2012).

En el caso particular de la madera, el estudio microestructural es necesario para comprender su comportamiento en los procesos de transformación y una vez puesta en servicio (Hoadley, 2000). Gran parte de estos estudios se han realizado empleando técnicas exploratorias 2D, limitando con esto el análisis tridimensional del material y la caracterización misma. Propiedades como la forma, el tamaño, la distribución o la cantidad de las células que conforman el tejido leñoso, son información complementaria susceptible de evaluar tridimensionalmente con la TC.

Por otra parte, en los procesos de industrialización, la madera puede presentar cambios en su microestructura, los cuales modifican sus propiedades tecnológicas (Homan & Jorissen, 2004), el interés por identificar estos cambios surge de la necesidad de garantizar la calidad de dichas propiedades. Es por ello que, el estudio de madera termotratada empleando técnicas no invasivas como la tomografía, resulta atractivo. Sin embargo, la investigación en madera con esta técnica es un área poco explorada, que requiere de más estudios para conocer el potencial de aplicaciones (Trtik *et al*. 2007; Olmos *et al.* 2016) y su utilidad estará en función de los parámetros que se logren evaluar eficientemente. Para tal condición un factor determinante es la resolución empleada en las imágenes producto de la TC (Mayo *et al*. 2010).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es analizar la microestructura de madera mediante TC de rayos-X bajo distintas resoluciones y un proceso de termotratamiento, a fin de identificar y delimitar aplicaciones útiles de la técnica en la caracterización de este material.

2. ANTECEDENTES

2.1 Microestructura de la madera

La madera, a nivel anatómico, está compuesta por un complejo tejido leñoso de células con diferente tamaño, forma, orientación, densidad, distribución, función e interconectividad, así mismo, la constituye una fase intercelular de espacios vacíos que funciona como recipiente ocupado por aire o sustancias diversas como el agua. Esta condición hace de la madera un material altamente variable en el espacio y anisótropo que afecta cada una de sus propiedades. Así, tenemos que las fibras de madera en latifoliada, son más pequeñas que las traqueidas en madera de coníferas, tienen paredes celulares de mayor espesor y lúmenes más pequeños, entre otras diferencias (Karlsson, 2006).

Elementos como las punteaduras tienen gran importancia en la funcionalidad del sistema de transporte de agua, las placas de perforación en los vasos permiten el flujo de líquidos, el espesor de la pared celular de las fibras tiene una relación directa con las propiedades físico-mecánicas. Células con poca área de pared celular y diámetros mayores que los de las fibras y los radios representan la proporción de los tejidos más blandos de la madera y su abundancia condiciona la de los demás tipos de tejidos (Bárcenas *et al*, 2005).

2.1.1 Microestructura del *Eucalyptus nitens*

La microestructura de esta especie se ha caracterizado por presentar tensiones internas y colapsos (Lausberg *et al*., 1996), que afectan la calidad de su madera. Los estudios realizados a su pared celular muestran importantes deformaciones en ésta, Gacitua *et al*., (2007) y Valenzuela *et al*.,(2012) concluyeron que la diferencia en propiedades de resistencia y rigidez entre las capas de la pared celular producen esfuerzos cortantes en las interfaces LM/S1, LM/S2, S1/S2, y que a mayor número de vasos de mayor diámetro con geometría elíptica y mayor área cubierta por estos, facilitan el plano de propagación de grietas, razones vinculadas con la madera de rápido crecimiento de plantaciones forestales.

2.1.2 Microestructura de *Acacia mangium*

Se han identificado problemas en el secado de alabeos (Prieto *et al*., 2017), acanaladuras, grietas, y alta variación en el contenido de humedad en la madera de esta especie (Moya *et al.,* 2011). Otras investigaciones la describen como propensa a colapsos y agrietamientos (Piao *et al*., 2000). Su microestructura es reportada con problemas de tensiones de crecimiento (Roque *et al.,* 2010) y no es apta para uso en exteriores en contacto directo con el suelo, ya que no es considerada con buena durabilidad natural (Hedge, 2013). Presenta una microestructua con fibras cortas (870 µm) de diámetros pequeños (18.9 µm) y pared delgada (2.4 µm), con baja proporción de parénquima y vasos, lo que le da buena resistencia mecánica (Hedge, 2013).

2.1.3 Función estructural del tejido leñoso

Las estructuras celulares son el elemento básico que constituye la madera, las características de estas estructuras le permiten resistir cargas en las diferentes direcciones y, en su interior, el flujo de fluidos. Debido a que la madera es un material natural, el diseño de estas estructuras celulares es altamente variable y anisótropo. El diseño de las estructuras celulares influirá en las propiedades del material (Silva & Gibson, 1997) como lo es el espesor de pared y la densidad porosa. La función de la estructura se divide principalmente en soporte mecánico y medio de transporte o almacenamiento (Bodig & Jayne, 1982).

2.2 Madera termotratada

La madera termotratada es el xilema modificado permanentemente como resultado de su interacción con temperaturas que oscilan los 200 °C (± 60°C), bajo atmósferas controladas generalmente con gases inertes que evitan la combustión (Borrega & Kärenlampi, 2008; Gunduz *et al*. 2010); en el punto de vista físico, tales modificaciones son un xilema con una densidad distinta marcada por cambios volumétricos y pérdida de masa, que no reflejan la calidad de la madera como habitualmente se conoce, debido a la distinta interacción estructural entre los componentes de su pared celular.

2.2.1 Microestructura de madera termotratada

La característica principal de la madera termotratada es que presenta cambios en los componentes estructurales de su pared celular durante la exposición a altas temperaturas (Boonstra *et al.* 2007; Esteves & Pereira, 2009). La degradación térmica puede resultar en rupturas o deformaciones en la estructura anatómica, vistas como formación de micro grietas perpendiculares o paralelas a la dirección de la fibra (Altgen *et al*. 2012; Awoyemi & Jones, 2011). La pérdida de masa es otro de los efectos observados en esta madera que recae directamente sobre la estructura (Gunduz *et al*., 2010). La interacción entre componentes estructurales de la madera puede ser distinta posterior al tratamiento, debido al fenómeno termoplástico, así mismo la degradación de hemicelulosas y zonas amorfas de celulosa, que finalmente afectarán las propiedades del tejido leñoso (Boonstra *et al*. 2007).

Se ha demostrado que estos cambios estructurales repercuten en las propiedades tecnológicas de esta madera, mejorando algunas de ellas y afectando otras, dependiendo del tratamiento térmico y de la especie (Hermoso *et al*., 2013; Syrjänen & Kestopuu, 2001). Lo anterior hace necesario el análisis microestructural de madera termotratada para obtener información cualitativa y cuantitativa de las deformaciones y deterioros que pudiera presentar.

2.2.2 Propiedades de madera termotratada

Las propiedades fisicomecánicas de la madera se modifican con el termotratamiento, los cambios se reportan en disminuciones de humedad de equilibrio entre el 2-50 % (Juodeikiené, 2013; Järmsä & Viitaniemi, 2001), disminución de hinchamiento hasta un 80 %, disminución de decaimiento fúngico cercanos a 40 %, menor masa (pérdida de masa) hasta 15 %, pérdida de resistencia a flexión estática (MOR) entre 2-80 % (Esteves & Pereira, 2009), entre otros.

2.3 Técnica de tomografía computarizada de rayos-X

La tomografía computarizada (TC) es una técnica de diagnóstico por imagen basada en rayos-X que permite obtener imágenes bi (2D) y tridimensionales (3D) de diferentes tipos de

estructuras, tejidos mineralizados, biomateriales, etc., de forma no destructiva y sin necesidad de pretratamientos de la muestra (Caeiro *et al*., 2015). Utiliza para ello un diodo al vacío, en el cátodo (tungsteno o molibdeno) se forma la nube de electrones los cuales son acelerados por diferencia de potencial en el diodo (máximo 600 kV) e impactados en el cátodo para generar los fotones de rayos-X (1 %) (Herrer & Kasner, 2011) por radiación de frenamiento. El espectro de rayos-X generado es dirigido hacia un detector de rayos-X y dentro de esta trayectoria es colocado el objeto de estudio. De acuerdo a Moretón (2016), los fotones inciden sobre el detector comúnmente CCD (charge coupled device) dispositivo de carga acoplada con propiedades fotoeléctricas (capta fotones y libera electrones), el cual está recubierto por una red de electrodos microscópicos cargados positivamente, los electrones liberados en el CCD cargados negativamente son atraídos y congregados alrededor de los electrodos; cada electrodo corresponde a un elemento del mosaico digital o imagen, conocidos como pixel. Posteriormente se lleva a cabo la operación de traspaso de electrones a un canal de lectura (hilera de electrodos sin electrones acumulados) y de ahí a un amplificador de salida donde se hace el recuento de electrones para que la imagen quede codificada numéricamente. Finalmente se divide la cantidad de electrones en cada pixel entre un número asignado por la ganancia en la cámara (depende del tamaño del pixel y tamaño de sensor CCD), como resultado se obtiene el rango dinámico o escala de grises de la imagen.

2.3.1 Principios de la tomografía computarizada

La TC se basa en la atenuación que sufre un haz de fotones de rayos-X al atravesar un espesor de materia. Cuando un haz de fotones atraviesa un material, sufren interacciones que dependen de su energía y las propiedades del material (densidad y número atómico) que está siendo irradiado (Juanes, 2010). Los fotones de rayos-X se absorben y dispersan en la materia a través de los mecanismos físicos de absorción fotoeléctrica, dispersión de Rayleigh y Thomson, dispersión de Copton entre otros; para pequeñas energías debajo de 100 keV, la absorción fotoeléctrica es el efecto dominante; para energías arriba 100 keV, la atenuación total es causada casi en su totalidad por la dispersión de Compton. Estos mecanismos se pueden definir con un solo coeficiente de atenuación lineal (Herrer & Kasner, 2011).

El coeficiente de atenuación lineal es específico de cada sustancia o materia. Para un rayo-X monoenergético (compuesto por una sola longitud de onda) que atraviesa un trozo uniforme de material, la atenuación que sufre se expresa de la siguiente manera:

$$I_{out} = I_{in} e^{-(\mu L)} \quad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde: I_{Out} es la intensidad del rayo X luego de atravesar el material, I_{In} es la intensidad del rayo-X incidente, μ es el coeficiente de atenuación lineal del material, L es la distancia recorrida por el rayo-X en el material, como el haz de rayos-X pasa a través de materiales de distintos coeficientes, podemos considerarlo como un material compuesto por un gran número de elementos de igual tamaño, de largo w, cada uno de los cuales posee un coeficiente de absorción constante. Estos coeficientes de atenuación están indicados como μ1, μ2,..., μn. Entonces:

$$(\mu_1 + \mu_2 + \cdots + \mu_n)\omega = In\left[\frac{I_{In}}{I_{Out}}\right] \quad \text{(Ec. 2.2)}$$

Para determinar la atenuación de cada elemento, debe obtenerse un gran número de mediciones desde distintas direcciones generando un sistema de ecuaciones múltiples, este es el principio de Hounsfield (Pereira, 2004).

Debido a que la fuente de radiación en la TC es polienergetica, para determinar los coeficientes de atenuación lineal se considera el número de fotones en lugar de la intensidad y la ecuación queda:

$$N = Noe^{-\mu x} \quad \text{(Ec. 2.3)}$$

Donde: N = Número de fotones receptados

No = Número de fotones de incidencia

μ = Coeficiente de atenuación lineal de un tejido

Para el tejido con distintas substancias la ecuación queda:

$$N = Noe^{-(\mu_1+\mu_2+\mu_3+\cdots+\mu_n)} \quad \text{(Ec. 2.4)}$$

2.3.2 Inspección de madera con tomografía de rayos-X

El empleo de la TC para el análisis de la estructura de la madera es relativamente moderno, las ventajas de esta técnica de análisis son: se obtiene una visión tridimensional de la estructura interna y se pueden realizar análisis in-situ de las muestras, ya que no es destructiva. De hecho, las imágenes obtenidas representan valores de la atenuación de los rayos-X, lo que es proporcional a la cantidad de energía absorbida y por consiguiente proporcional a la densidad media del material, que es un buen estimador de las características anatómicas de la estructura (Ballesteros *et al*., 2013).

La resolución de la imagen o tamaño de voxel es fundamental para poder analizar la estructura de la madera, elegir un tamaño adecuado estará en función de lo que se quiere observar. Sin embargo, al aumentar la resolución se disminuye el campo de visión, de esta manera habrá más voxeles por unidad de volumen que definan una estructura, pero será menor la cobertura total de estos (Brodersen, 2013). Cuando el tubo emisor genera un haz cónico proyecta una imagen magnificada, así la reducción de la distancia entre el tubo de rayos-X emisor y la muestra ayudan a mejorar la resolución, pero reducen el campo de visión; para mejorar esta condición se han implementado otras técnicas como la de contraste de fases, donde los detectores requieren alta resolución (Mayo *et al.,* 2010), en la tomografía clásica es posible explorar zonas contiguas con distinta resolución con la ayuda de software especializados (Brodersen, 2013), estos son factores decisivos si es considerado que elementos estructurales de la madera como las puntuaciones son del orden de 1.5 μm a más y que existen longitudes de fibra mayores a los 2 mm.

2.4 Tratamiento de imágenes

La señal de una imagen puede presentar interferencias que distorsionan la información que transporta, por lo que se hace necesario el tratamiento digital de señales a través de un sistema. El método o conjunto de reglas para implementar el sistema mediante un programa que realice las operaciones matemáticas correspondientes se denomina algoritmo, estos mismos algoritmos son utilizados para manipular la imagen y extraer la información contenida o conformada por sus elementos constitutivos denominados voxel (Proakis & Manolakis, 1989). Existen al menos

2 tratamientos básicos aplicables a la señal de las imágenes, la eliminación del ruido térmico y el aplanamiento de campo. El ruido térmico se refiere a los electrones producidos por aumento en la temperatura del censor CCD (corriente oscura) y el aplanamiento de campo a la corrección de falta de uniformidad en la imagen generada por ruido de lectura durante el cálculo del rango dinámico (Moretón, 2016).

2.4.1 Filtros

La mayoría de las implementaciones de filtros se realizan en dos dominios: el domino espacial y el domino frecuencial. Los métodos basados en el dominio espacial hacen referencia a la manipulación directa de la luminiscencia de los pixeles, mientras que los métodos basados en el dominio frecuencial (transformada discreta de Fourier) modifican indirectamente la luminiscencia de cada pixel utilizando como factores de ponderación los valores de los otros pixeles de la imagen o del entorno del punto y las relaciones numéricas entre ellos. Las operaciones espaciales se pueden entender como la modificación directa del espectro de frecuencias de la imagen, por supuesto, este espectro de frecuencias se definen como frecuencias espaciales para una imagen (González *et al*., 2006). El filtrado se emplea de formas muy variadas en el procesamiento digital de señales; por ejemplo, para eliminar el ruido indeseado que pueda existir en las señales deseadas, para conformación espectral en la ecualización de canales de comunicación, en la detección de señales de radar, sonar y de comunicaciones y para realizar el análisis espectral de señales (Proakis & Manolakis, 1989).

2.4.2 Segmentación

La segmentación es el proceso de separar los objetos de la imagen en contraste con el fondo. La forma más simple de segmentación se basa en la diferencia en las intensidades de brillo de los objetos y el fondo. Se busca un valor de intensidad mínimo y máximo, para que todos los pixeles que pertenecen a los objetos de interés tengan intensidades entre el mínimo y máximo, y todos los otros pixeles tengan valores de intensidad por debajo del mínimo o por encima de máximo.

El resultado de una segmentación a menudo se representa como una (imagen binaria) máscara binaria (Baeker, 2010).

2.4.3 Transformación geométrica

Estos algoritmos modifican las características geométricas de las imágenes, se aplican en la reconstrucción de imágenes deformadas, el giro y ajuste de las mismas o la deformación intencionada de ciertos rasgos para posteriores análisis. Generalmente los más utilizados son los de escalado, translación, giro y espejo. Todos los algoritmos correspondientes a transformaciones geométricas se basan en realizar una nueva distribución de los pixeles. El proceso de transformación geométrica se fundamenta en: determinar las nuevas coordenadas de cada *pixel (i,j)* en la rejilla transformada, *(i',j')* (González *et al*., 2006).

2.4.4 Transformación morfológica

Los operadores morfológicos definen las transformaciones de forma y estructura de los objetos. Estas herramientas matemáticas permiten obtener componentes que dan una idea de la forma y estructura de los objetos que forman la imagen. Además, permiten modificar estas formas para separar los objetos unos de otros, obtener contornos primarios, descomponer formas complejas en formas más simples, obtener contornos dentro de entornos ruidosos, reconstruir elementos distorsionados (Erosión, dilatación, esqueletonización, abertura, cierre). La morfología matemática analiza imágenes usando operadores desarrollados con la teoría de conjuntos (González *et al*., 2006; Nixo & Aguado, 2012).

2.4.5 Descriptores de región y frontera

Son parámetros que se obtienen del estudio del contorno de los objetos (González *et al*., 2006). Una región generalmente describe los contenidos (o puntos interiores) que están rodeados por un límite (o perímetro) que a menudo se llama el contorno de la región (Nixo & Aguado, 2012).

La forma del contorno es generalmente analizada con el estudio de su circularidad, diámetro, área, perímetro, solidez, etc.

2.5 Permeabilidad

La permeabilidad es considerada como la capacidad que tiene un material a ser penetrado por un cuerpo líquido, la permeabilidad dada en un medio poroso continuo es afectada por la interacción entre el medio y las propiedades del fluido, dicha interacción genera un sistema en el que el gradiente de presión, el tipo de flujo, el tipo de fluido y la tortuosidad del medio determinan el nivel de permeabilidad en un sólido poroso. Para los flujos laminares, la permeabilidad puede ser conocida con los parámetros en la ley de Darcy (Latief *et al*., 2017) como:

$$k = \frac{Q_{\mu}}{A}\frac{1}{dP/dL} \qquad \text{(Ec. 2.5)}$$

Donde: k es la permeabilidad del medio (m^2), Q es el caudal volumétrico ($m^3 \cdot s^{-1}$), μ es la viscosidad absoluta del fluido ($kg \cdot (s \cdot m)^{-1}$), A es el área del medio y dP/dL es el gradiente de presión entre la entrada y salida del medio ($Pa \cdot m^{-1}$). La ecuación se modifica en las simulaciones utilizando a la velocidad promedio en el medio ($\langle v \rangle$) a:

$$k = \frac{\mu\langle v \rangle}{dP/dL} \qquad \text{(Ec. 2.6)}$$

2.5.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional CFD (Computational Fluid Dinamics) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos para estudiar y analizar

problemas que involucran fluidos en movimiento, mediante la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, transferencia de calor e incluso otras (reacciones químicas) en el computador. Existen diferentes métodos numéricos y algoritmos que resuelven de distinta forma las ecuaciones fundamentales (INDISA, 2009).

2.5.2 Tortuosidad

La ruta de un fluido en un medio poroso puede ser microscópicamente muy tortuoso y complicado. En general, la tortuosidad de flujo se define como la relación de la longitud media de rutas de flujo al espesor de la muestra en la dirección del flujo (Aaltosalmi, 2005). La tortuosidad geométrica, es entendida como el grado de dificultad en la trayectoria de un fluido. Una forma de calcular esta propiedad durante las simulaciones es a través de la ecuación 2.7, en donde τ es el cociente de tortuosidad, $|v|$ es el valor absoluto de la velocidad de flujo local, v_x es la componente x de la velocidad promedio en la dirección de flujo y $\langle\ \rangle$ denota el promedio espacial a través del poro.

$$\tau = \langle|v|\rangle/(\langle vx\rangle) \qquad \text{(Ec. 2.7)}$$

3 JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Justificación

La tomografía de rayos-X ha sido utilizada para la descripción y análisis de materiales, así como en cuestiones médicas por varios años. Recientemente es aplicada para descripción microestructural de los elementos funcionales del árbol. Sin embargo, poco ha sido utilizada para la descripción de la estructura de la madera con la finalidad de inferir comportamientos en los procesos de transformación o usos de la madera. Es, por ello, la necesidad del presente estudio de analizar la microestructura de madera de plantaciones forestales comerciales de rápido crecimiento y de madera modificada mediante un termotratamiento, a través de tomografía de rayos-X, para caracterizar la microestructura e identificar cambios estructurales.

3.2 Hipótesis

La medición de las características microestructurales de la madera y la observación hacia el interior de esta, es posible empleando tomografía computarizada.

La tomografía computariza permite estimar propiedades de permeabilidad y medir cambios en el tejido.

3.3 Objetivo General

Analizar la microestructura de la madera a través de imágenes de tomografía computarizada de rayos-X.

3.3.1 Objetivos específicos

Determinar la microestructura de *Eucalyptus nitens y Acacia mangium* mediante tomografía computarizada.

Evaluar cambios microestructurales de la *Acacia Mangium* debido al efecto del termotratamiento.

Estimar las ventajas y desventajas de la Tomografía Computarizada para el estudio de la madera.

CAPÍTULO 1

4 ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE LA MICROESTRUCTURA DE *Eucalyptus Nitens* MEDIANTE IMÁGENES DE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS-X Y SIMULACIÓN DE FLUJO CFD

4.1 Resumen

En este capítulo fue utilizada la tomografía computarizada estableciendo un tamaño de voxel de 0.5 µm, con el objetivo de analizar detalladamente la microestructura anatómica de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden procedente de una plantación comercial de 8 años. La secuencia de imágenes adquirida fue tratada para su diagnóstico, en el cual se proporcionan datos cualitativos y cuantitativos hasta un nivel de puntuación en fibras. Fue posible separar virtualmente las fases de la matriz para obtener información individualizada. La capacidad de flujo dentro del tejido se evaluó por simulación de fluidos computacional CFD por el método de ecuaciones de Navier Stokes, esto fue posible ya que se conservó la continuidad en la conectividad de la fase porosa. Se definió la fracción en volumen del espacio intercelular y del tejido leñoso con un 15.66 y 84.33 % respectivamente. La pared celular presentó deformación y microgrietas como indicio de esfuerzos ortótropos en el tejido. Se identificó un abultamiento tangencial parenquimatoso en fibra ATPF simulando un alineado horizontal en las fibras de esta especie, el cual presentó evidencia de interferir en las deformaciones. La tortuosidad de sus conductos fue evaluada. Se concluye: su anatomía tiene características que pueden dificultar la calidad de su aserrado o secado, es posible cuantificar objetos con un mínimo de 0.5 µm con la resolución empleada y la técnica es consistente en los resultados que arroja.

4.2 Introducción

Desde inicios del presente siglo se reporta un excedente global en la producción de madera para pulpa dura o de Eucalipto, este factor aunado a la mayor producción de papel reciclado (Shield, 2000), han hecho necesaria, hasta la presente década, la búsqueda de nuevas salidas en el mercado para maderas como el *Eucalyptus nitens* (López, 2016). Por lo cual se han realizado estudios para darle otras aplicaciones industriales (Bown & Lasserre, 2015; Gonzáles *et al.*,

2016; Mendoza *et al*., 2015; Sharma *et al.*, 2017). Esta especie es plantada en México en zonas que oscilan los 2000 msnm (Espinoza *et al*., 2016; Garibay, 2015). Debido a su resistencia a bajas temperaturas (-3°C), su rápido incremento medio anual en volumen de 48.6 m^3 ha^{-1} $año^{-1}$ (Muñoz *et al*., 2005), es una especie con potencial maderable.

El aprovechamiento de plantaciones que proveen un abastecimiento sostenido de la industria maderera es primordial en México. Sin embargo, la madera de árboles jóvenes provenientes de plantaciones de rápido crecimiento presenta propiedades tecnológicas de menor calidad (Biechele, *et al*., 2009; Montagu, *et al*., 2003; Nolan *et al*., 2005). Los problemas comunes de esta madera son la acumulación de tensiones en el tejido, que generan grietas y colapsos en la madera (Gacitua *et al*., 2007; Valenzuela *et al*., 2012b), contracción transversal de células durante el secado (Rozas *et al*., 2005), facilidad de propagación de grietas por más vasos de mayor diámetro y más frecuencia (Valenzuela *et al*., 2012a). Es bien sabido que la calidad que tiene la madera para una aplicación específica, está determinada por sus características anatómicas y propiedades químicas.

Para determinar las características anatómicas de la madera generalmente se emplean técnicas convencionales que visualizan por separado los distintos planos expuestos de la madera en 2D (Alfonso *et al*., 1989). La técnica de microscopía óptica utiliza secciones de corte bidimensionales, lo cual es una desventaja para la observación espacial del tejido, y la información adquirida carece de datos sobre la arquitectura espacial e interacción estructural o su continuidad (Brodersen, 2013). Además, la superficie observada sufre alteración durante la preparación de las muestras. Para contrarrestar parte de estas desventajas, se han realizado trabajos (Bosshard & Kučera, 1973) en los que se integra una secuencia de imágenes de secciones 2D, las cuales se toman después de realizar cortes finos a la muestra, sin embargo el grado de operación requerido es muy alto y la técnica es destructiva. De manera alterna, la microtomografía computarizada de rayos-X (µTC) es una técnica no destructiva, que permite la exploración tridimensional de la madera desde distintos ángulos sin seccionar físicamente las muestras, evitando modificaciones en la superficie de la muestra o la interferencia en la trayectoria celular.

En los últimos años se han intensificado las aplicaciones de la µTC en especies de coníferas y latifoliadas, proporcionando información en el análisis de fibras (Chinga *et al*., 2010), vasos

(Brodersen *et al*., 2013) e incluso en contenido de partículas minerales (Olmos *et al*., 2016). Su efectividad está relacionada con el tamaño de voxel empleado (Mayo *et al*., 2010); a menor tamaño se observan estructuras más finas, pero el campo de visión se reduce.

Debido a lo anterior y a que la importancia de continuar investigando la microestructura del *Eucalyptus nitens* es para conocer las causas que provocan los problemas de deformación en esta madera, el objetivo de este trabajo es el estudio de la estructura anatómica de las fibras y los radios medulares de la madera de *Eucalyptus nitens* procedente de una plantación forestal de 8 años, mediante imágenes tridimensionales, empleando la µTC para identificar la interconectividad de su porosidad, y características que son difíciles de observar mediante técnicas convencionales de caracterización, además de determinar la permeabilidad en las 3 direcciones de la madera mediante simulaciones computacionales, utilizando las imágenes 3D obtenidas de la TC.

4.3 Materiales y Métodos

4.3.1 Preparación de las muestras

El material experimental consistió en madera de *Eucalyptus nitens* procedente de una plantación forestal comercial (PFC) de 8 años, localizada en el estado de Michoacán, México, entre las coordenadas 19°54” de latitud norte y 100°27” longitud Oeste y a una altitud de 2020 msnm, con temperaturas entre 14 y 30°C, y una media de precipitación anual de 897.7 mm. Los troncos fueron aserrados utilizando una sierra cinta vertical de 4”, posteriormente las tablas obtenidas, fueron secadas en una estufa Hildebrand® con capacidad de 1 m^3, con una secuela según Simpson (1996), y climatizadas a 12% de contenido de humedad (Garibay, 2015). A partir de este material, se seccionaron las piezas para la tomografía.

Las muestras se dimensionaron acorde al tamaño de voxel empleado y en base a la parte de la microestructura a observar, en el cuadro 4.1 se especifican estos datos. El seccionamiento de las muestras se realizó con una navaja de acero manual y sin previa preparación de las superficies

ni posterior rectificación. El ancho y grueso de las probetas corresponde a la dirección radial y tangencial y el largo a la dirección longitudinal a las fibras (Fig.4.1).

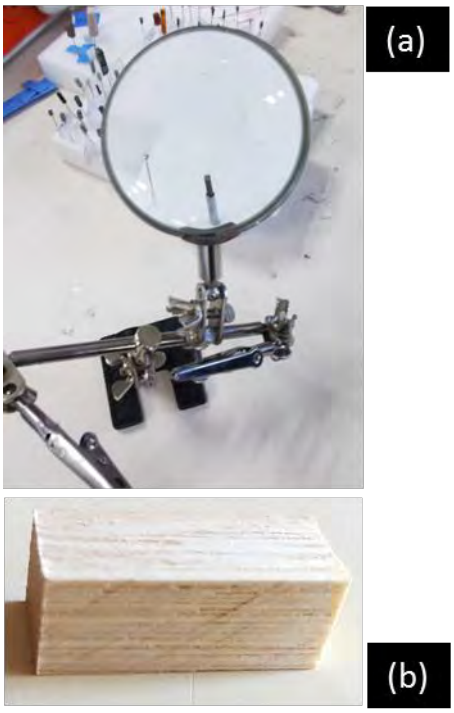


Fig. 4.1. Probetas de *Eucalyptus nitens* Maiden. a) Probeta de 1x1x10 mm, b) Probeta de 8x8x20 mm.

Cuadro 4.1 Dimensión de probetas de madera y objeto de estudio para imágenes TC rayos-X

Especie	Probeta a x g x l (mm)	Tamaño de voxel (µm)	Elemento microestructural a observar	Objeto de estudio
Eucalyptus nitens	1 x 1 x 10	0.5	Fibras y Parénquima	Caracterización del material

Posterior a la preparación del material se seleccionó una probeta de 1 x 1 x 10 mm sin defectos superficiales aparentes.

4.3.2 Adquisición de imágenes

4.3.2.1 Tomografía computarizada

La adquisición de imágenes 3D se llevó a cabo en un equipo de tomografía Xradia Zeiss Versa 510 (Fig.4.2) con una fuente de rayos X de alta energía (30 -160 kV, 10W), donde para obtener las medidas de atenuación del haz de rayos-X que pasa a través del material, la muestra se colocó entre la fuente del haz y el detector CCD a una distancia ajustada que permitió obtener el tamaño de voxel deseado. Se utilizó una tensión de 50 Kv, 1600 radiografías fueron tomadas a un desplazamiento angular de 0.225° en torno a la muestra, con un tiempo de exposición de 6s para cada una. La resolución elegida para las imágenes fue en función del diámetro estimado de las fibras que presenta el *Eucalyptus nitens* en su estructura, por lo que se utilizó un tamaño de voxel de 0.5 µm. El tamaño de la imagen empleada fue de 976 x 1015 x 988 pixeles, lo que representa un volumen de 0.488 x 0.507 x 0.494 mm. Para eliminar defectos en la imagen causados por el espectro con baja energía, se utilizó una hoja de cobre como filtro de estos. En la adquisición de imágenes 3D se utilizó un algoritmo de reconstrucción tomográfica, que procesa los coeficientes de atenuación espacial formando la intensidad de brillo en la escala de grises, la secuencia de reconstrucción es parte del software del sistema de TC. El porte de la matriz de la cámara conocido como binning fue de 1024 x 1024 pixeles, el cual limita la resolución elegida para las imágenes.

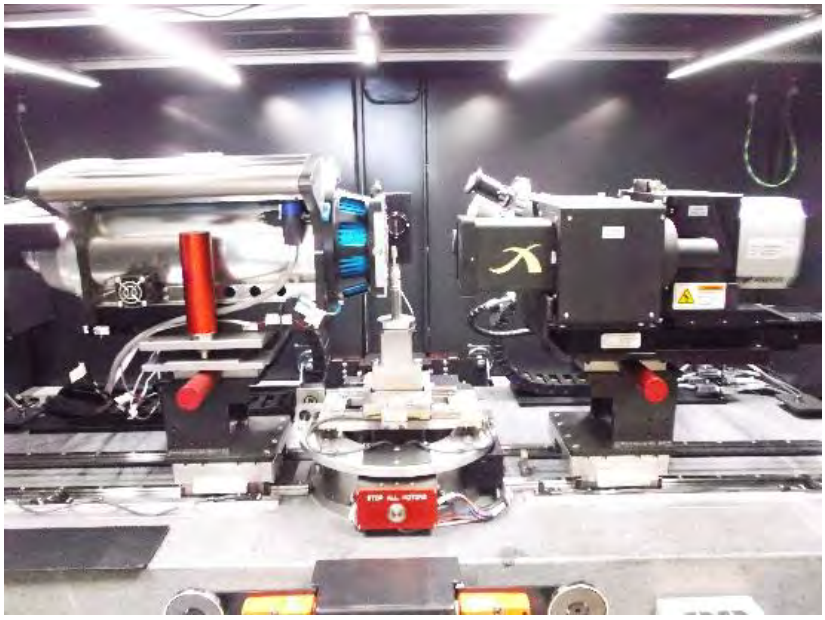


Fig. 4.2. Tomógrafo Xradia Zeiss Versa 510

4.3.2.2 Software utilizado

Con el fin de optimizar los recursos informáticos y mejorar aspectos de la imagen que permitieran el análisis del tejido celular, se aplicaron diferentes algoritmos a los datos de los pixeles. Ésta manipulación de imágenes se realizó con los programas libres de código abierto ImageJ y Fiji, a donde se exportó la secuencia de imágenes iniciales 2D que conforman la imagen reconstruida 3D y se extrajeron secciones centrales para su análisis. Las simulaciones se realizaron con el software GeoDict® (Math2Market GmbH, www.geodict.com) para el estudio de permeabilidad. En este software se realizaron las simulaciones de fluido computacional CFD (Computational Fluid Dinamics). Para reconstruir las imágenes 3D de conectividad y calcular la tortuosidad se utilizó el software AVIZO®.

4.3.2.3 Tipo de imagen

La adquisición de imágenes es en archivo no comprimido formato TIFF (Tagged Image File Format) o formato de archivo de imagen etiquetada, el cual almacena las imágenes con gran cantidad de niveles de color (16 bits para el tomógrafo utilizado) con excelente calidad. Sin embargo, este tipo de archivo requiere gran cantidad de espacio durante su almacenamiento y exige recursos informáticos de gran capacidad. Por lo que las imágenes se trabajaron en 8 bits, con una profundidad de color de 255 niveles únicamente.

4.3.3 Tratamiento de imágenes

Para el análisis se extrajeron secciones centrales de la imagen inicial realizando cortes virtuales. En la medición de las características geométricas se emplearon 3 secciones de 150.19 x 150.19 x 425.53 μm, las cuales se tomaron a un costado del vaso (C1), frente al vaso (C2) y alejada del vaso (C3), como se ilustra en la Fig.4.3.

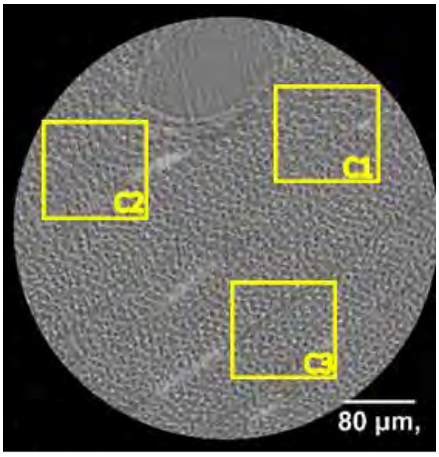


Fig. 4.3. Posición de los cortes virtuales en la imagen inicial de 976 x 1015 x 988 pixeles.

4.3.3.1 Filtración

Las imágenes se filtraron para eliminar ruido generado durante la exposición a los rayos-X, aplicando un filtro de media 3D, donde de acuerdo al histograma de intensidad de brillo de los voxeles en la escala de grises, la desviación estándar representativa del ruido fue disminuida (Fig.4.4a y 4.4c histogramas de Fig.4.4b y 4.4d respectivamente). Los datos registrados en la adquisición de la imagen, provenientes de fuentes no deseadas, son el ruido eliminado.

La relación señal-ruido (signal to noise ratio) se modificó a fin de aumentarla y poder apreciar cualitativamente los límites (bordes celulares) de las estructuras de la imagen, para lo cual se aplicó el filtro rápido de suavizado (border limited mean). Este filtro reduce el peso (valor de intensidad) de los pixeles fronterizos (bordes) al mismo valor que el de los interiores y así el ruido en las fronteras no es una fuerte influencia en los resultados.

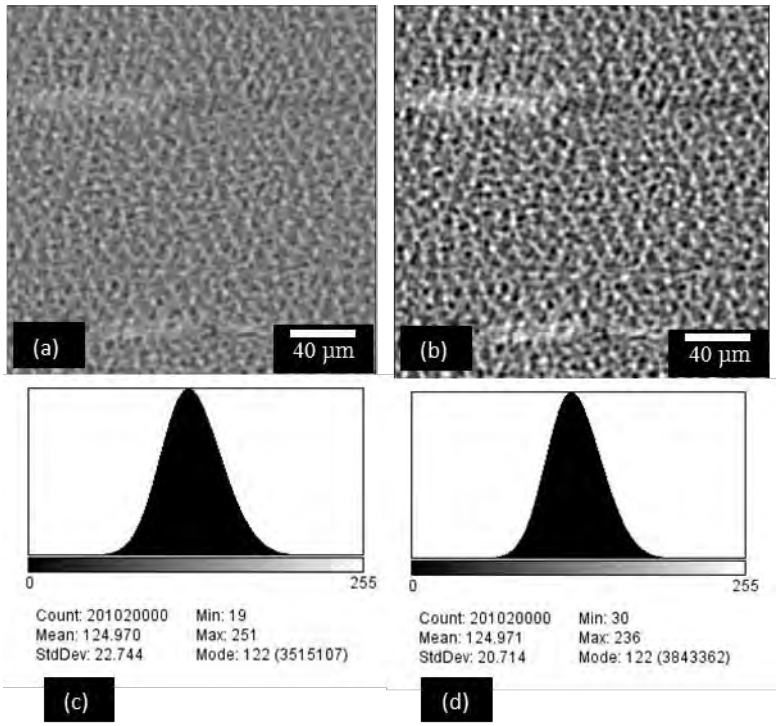


Fig. 4.4. Tratamiento de imágenes con ImageJ. a) sección virtual de imagen inicial de 225 x 225 µm, b) imagen con tratamiento de filtro de media 3D y stretching, c) histograma de intensidad de brillo de voxel en sofware ImageJ con estadísticos antes de aplicar el filtro de media 3D, d) estadísticos después de eliminar ruido con el filtro de media 3D.

4.3.3.2 Brillo y contraste

Posteriormente se optimizó el contraste entre los distintos niveles de gris de la imagen, intensificándolo con la técnica de stretching, que recalcula el valor del pixel, estirando (normaliza) el rango de valores de intensidad de la imagen para que abarque otro rango dinámico posible definido por la imagen activa (8-bit), a una saturación de pixeles del 0.4%.

4.3.3.3 Segmentación

La segmentación virtual de la fase sólida y porosa en madera, se realizó por binarización de las imágenes filtradas, aplicando el método de auto umbralización local Sauvola (Sauvola & Pietikäinen, 2000). La binarización es la asignación del valor cero a los pixeles con valor fuera del umbral y valor uno a los umbralizados. Por su parte el método Sauvola consiste en umbralizaciones locales en cada pixel, que consideran la media y la desviación estándar de un alcance especificado. Para realizar la simulación de permeabilidad fue necesario mantener la continuidad original entre los lúmenes de los rayos medulares, puntuaciones y fibras, además de obtener bien definida la pared celular durante la binarización. Esto es importante debido al efecto que tiene la complejidad de la trayectoria de flujo sobre la permeabilidad. En las simulaciones se ha demostrado que estructuras de poro complejas (aumento de tortuosidad) propician menor permeabilidad, al mismo tiempo que la pueden facilitar cuando estos poros se encuentran interconectados. Para la madera de *Eucalyptus nitens* la contribución o la obstrucción que representa la fase porosa a nivel de fibras y parénquima sin considerar los vasos, tiene una clara dependencia de las puntuaciones que interconectan a los lúmenes de las células. Por este motivo la continuidad se conservó aplicando la umbralización Sauvola en la dirección transversal, radial y tangencial por separado, el cual se ajustó adecuadamente al tejido celular (Fig.4.5)

Para segmentar virtualmente las partes de la estructura celular con una intensidad de brillo de interés particular, se utilizó el método de umbralización manual a través del histograma de intensidad de brillo umbralizando únicamente los valores correspondientes. A la imagen binaria resultante de la fase sólida de interés se le aplicó el filtro Gaussiano Blur 3D, para obtener los bordes no afilados y poder apreciar el relieve de la estructura. El filtro utiliza una función Gaussiana para, a través de un proceso de convolución, recalcular el valor del pixel que es un

promedio ponderado de la vecindad de cada pixel. Finalmente la imagen se proyectó con el 3D rendering.

Una vez binarizadas las imágenes se procedió a medir los parámetros cuantitativos.

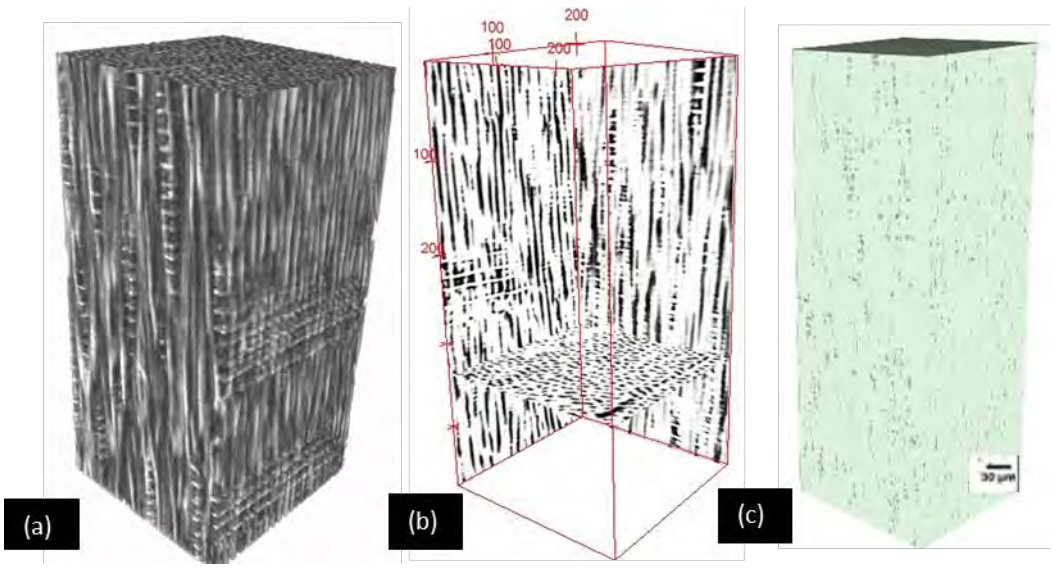


Fig.4. 5. Rendering 3D en sofware ImageJ de madera de *Eucalyptus nitens*. a) matriz de la madera en todas sus fases, b) binarización óptima en la dirección radial, tangencial y transversal, c) binarizacion de puntuaciones en un corte virtual de 150.19 x 150.19 x 425.53 µm.

4.3.3.4 Niveles de brillo

Las mediciones de los niveles de brillo en los pixeles de las imágenes se realizaron en 2D, con los trazos de perfil para cada una de las rutas marcadas. Se dividieron 3 principales rutas: las trazadas sobre la pared tangencial de las fibras, pared radial de las fibras y sobre el radio medular. La medición en 3D se realizó en un volumen a través de la dirección longitudinal a las fibras, tomado como dirección z.

4.3.3.5 Caracterización geométrica

La fracción de volumen de cada fase se calculó utilizando la técnica de conteo de voxeles que

pertenece a una fase y dividiéndolo por el número total de voxeles contenidos en la imagen; la suma de todas las fases representa el total del volumen analizado. La fracción de volumen de poros de las puntuaciones se realizó por separado para la dirección radial (cara tangencial) y dirección tangencial (cara radial) las cuales se sumaron a la fracción de volumen de poros de fibra, para determinar la porosidad total del volumen analizado. En el caso de la porosidad de los radios esto no fue necesario, ya que está implícita en la medición longitudinal. El espesor de pared de fibra se evaluó realizando aberturas 3D sobre los voxeles de la imagen, que consisten en aberturas morfológicas secuenciales 3D (erosión de voxeles seguida de dilatación indiscriminada) con aumento progresivo del tamaño del elemento estructurador (en este caso fue utilizado un octaedro).

Debido a que un lumen deformado o con cambios en volumen estará mejor representado por el área de éste. Se calculó el área en cada poro del total de los cortes (slices) que conforman las imágenes 3D lo que resulta en la caracterización del total del volumen ocupado por el lumen, el software ajusta la medición al área del poro sin importar la forma del perímetro que tenga, cuantificando los voxeles que la cubren. Para medir el área se seleccionaron los poros de interés, estableciendo un rango en base al área ocupada, discriminando las áreas extremas reducidas en las puntas de las fibras y las áreas mayores correspondientes a microgrietas. Las deformaciones que presenta una pared celular tensionada o comprimida en sentido transverso, pueden ser observadas como contornos elípticos del lumen. Cuantificando este tipo de deformación en todo el volumen de la muestra sin limitarlo a rangos, es posible obtener una estimación de las deformaciones en el tejido. Para estimar la forma tipo elíptica que tiene el tejido en sentido transversal a las fibras se calculó la circularidad (C) de los poros, la cual está dada por (ec.4.1) la relación entre el perímetro (P) y el área (A), con valor 1 para círculos y valores tendientes a 0 para figuras alargadas. La deformación de la pared celular se calculó con (Ec.4.2) la solidez (S) de los poros que relaciona el área (A) de este con el área convexa (Ac) que lo circunscribe. La alta concavidad (ondulaciones) en el perímetro del poro está representada por una menor área que la circundante de este y, como resultado, una solidez que tiende a 0. De esta manera, una deformación nula en la pared celular tendrá una solidez máxima de 1; para cuantificar la solidez no se limitaron los rangos. La medición de diámetros de poros en el total del volumen se realizó estableciendo el mismo rango que en el cálculo del área, el diámetro de Feret considera

la distancia perpendicular entre 2 tangentes al poro, por lo que está influenciado por la deformación del poro, por otro lado el diámetro mínimo de Feret arroja el diámetro entre las dos tangentes más cercanas al contorno del poro. Para el cálculo de área y diámetro mínimo de Feret del lumen de las puntuaciones, se aplicaron procedimientos análogos que al de fibras. Para calcular la densidad teórica (ρT) del volumen analizado, se utilizó la densidad real (ρr) del tejido leñoso de 1.5 $g \cdot cm^{-3}$ reportada por Kollmann & Côté, (1968) y la fracción de volumen sólido en % (Vs) en relación con la porosidad presente (Ec.4.3), esta densidad es únicamente una estimación aproximada para utilizarla como punto de referencia en el tejido, ya que está influenciada por la fracción de volumen considerada (en este caso sin vasos) y por la densidad real reportada en la literatura.

$$C = 4\pi A / P^2 \quad \text{(Ec. 4.1)}$$

$$S = A/Ac \quad \text{(Ec. 4.2)}$$

$$\rho T = (Vs\ \rho r)/100 \quad \text{(EC. 4.3)}$$

El porcentaje de conectividad (β) en un medio poroso es un parámetro de importancia para la permeabilidad, debido a que el flujo que se puede presentar en la porosidad de fibras y parénquima en la madera (sin considerar vasos) estará concentrado, principalmente, en parte de esta porción. A menor porosidad interconectada y a menor comunicación con un conducto exterior, existirán mayores zonas del tejido con porosidad aislada o con porosidad interconectada, pero aislada del exterior. Por lo que estas zonas estarán propensas a una difícil preservación y secado, además de propensas a originar tensiones en las interfaces de las zonas conectadas al exterior y las zonas aisladas. Para estimar la β se dividió la conectividad estimada (voxeles conectados) entre el volumen (total de voxeles) de la pila de imágenes (V). Para obtener el porcentaje de conectividad cerrada (β^o), únicamente se dividió la conectividad cerrada, que corresponde a los voxeles conectados sin comunicación al exterior, entre el total de voxeles del volumen analizado.

4.3.4 Simulaciones de flujo

Una vez binarizadas las imágenes, se exportaron al software GeoDict® (Math2Market GmbH, www.geodict.com) para la simulación de permeabilidad. En este software se realizó una simulación CFD (Computational Fluid Dinamics). Los CFD emplean un dominio computacional (fluido) para formar un enmallado compuesto por celdas, a los puntos nodales de cada celda se les realizan los cálculos de permeabilidad o velocidad de flujo promedio cuando estos cruzan la fase porosa.

4.3.4.1 Método de simulación

En este trabajo se utilizó la simulación por el método Navier-Stokes con algoritmo Simple FFT (Fast Furier Transform), este método fue utilizado por otros autores, con éxito en estructuras con porosidad compleja y pequeña (Cheng, et al., 2013). Las ecuaciones fundamentales de Navier-Stokes que describen el comportamiento del fluido, consumen tiempos considerables cuando son resueltas numéricamente por CFD. Por otro lado, se ha demostrado la reducción en los tiempos de cálculo durante el CFD con el uso del algoritmo Simple FFT (Cheng, et al., 2013).

Para calcular la permeabilidad se utilizó el módulo FlowDict del software GeoDict®, el cual emplea la ley de Darcy para velocidades lineales. Esta ley es expresada como (Ec.4.4):

$$K = Q\mu/A \;\; 1/(dP \;/\; dL) \qquad \text{(Ec. 4.4)}$$

Donde K es la permeabilidad del medio en m^2 o en μm^2, Q es el caudal volumétrico del fluido en $m^3 \cdot s^{-1}$, μ es la viscosidad dinámica del fluido en $kg\ (s \cdot m)^{-1}$, A es el área del medio y $dP \cdot dL^{-1}$ es el gradiente de presión entre la entrada y salida del medio en $Pa \cdot m^{-1}$. Para la simulación se utilizó una temperatura de 20°C, como fluido estándar el agua con una densidad de 998.234 $kg \cdot m^{-3}$ y una viscosidad de 0.001 $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$.

La tortuosidad geométrica, entendida como el grado de dificultad en la trayectoria de un fluido, fue estimada por el software AVISO®. La forma de calcular esta propiedad es a través de la

ecuación 4.5, en donde τ es el cociente de tortuosidad, |v| es el valor absoluto de la velocidad de flujo local, v_x es la componente x de la velocidad promedio en la dirección de flujo y ⟨ ⟩ denota el promedio espacial a través del poro.

$$\tau = \langle |v| \rangle / (\langle v x \rangle) \qquad \text{(Ec. 4.5)}$$

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Identificación cualitativa anatómica

A partir de las imágenes realizadas por microtomografía computarizada de rayos-X se obtuvo virtualmente la reconstrucción tridimensional de la microestructura interna de la madera. Además fue posible seleccionar las diferentes regiones de interés y segmentarlas del tejido leñoso, un ejemplo de ello se muestra en la imagen inferior (Fig. 4.6). Estos cortes se desplazaron en las coordenadas *x, y* y *z*, indicadas con el tratamiento de imágenes, permitiendo con ello el desplazamiento en los planos longitudinal-radial (Lr), longitudinal-tangencial (Lt) y transversal (T) a la fibra de la madera; como se observa en la imagen (Fig. 4.6), donde queda al descubierto la estructura original interna de madera de *Eucalyptus nitens,* sin alteraciones de la muestra a diferencia de los métodos destructivos que presentan esta desventaja durante su utilización.

En la reconstrucción tridimensional es notable la pared celular de las fibras y los radios medulares, en contraste con los espacios intercelulares de color menos brillante en la escala de grises (Fig. 4.6).

Fig. 4.6. Reconstrucción tridimensional con imagen de µTC de rayos-X de la microestructura celular de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden.

En los cortes transversales a la fibra se encontraron deformaciones y microgrietas en la pared de estas. Las deformaciones (indicadas con flechas amarillas en la Fig. 4.7) se observan como formas elípticas en el perímetro interno de la pared y las microgrietas (indicadas con flechas rojas en la Fig. 4.7) se identifican por la separación de la pared y consecuentemente la comunicación de 2 o más segmentos de lumen (no siempre se comunican a todo lo largo de éste), extendiéndose mayormente en sentido paralelo a los anillos de crecimiento (Fig. 4.7a). Defectos similares en el tejido de esta especie fueron identificados por Gacitua *et al*. (2007) quienes atribuyeron el defecto a la concentración de esfuerzos en el tejido y lo relacionaron con

la lamela media y la capa S1.

Con la µTC fue posible identificar un abultamiento característico en las fibras de todo el volumen analizado. Estos abultamientos son de un espesor de entre 1.0 a 2.0 µm y de ancho superior al de la pared de la fibra, presentes en la pared tangencial de las fibras.

En la Fig. 4.7b del plano T, el abultamiento muestra claramente su orientación tangencial, perpendicular a la orientación de las células de radio. La diagonal formada respecto de los radios por estos abultamientos y vista (flechas amarillas) como trazos más luminosos, son el resultado de que en esta especie las paredes tangenciales de las fibras contiguas no se encuentran alineadas unas de otras y a que el material de composición del abultamiento, irrumpe únicamente sobre la cara tangencial de las fibras (Fig. 4.7b). De acuerdo a estas mismas imágenes, existe una suma de la pared tangencial de la fibra y la composición de estos abultamientos. Lo que generó sitios en el tejido observados con mayor luminiscencia, debido a la mayor atenuación del haz de rayos X por presencia de mayor cantidad de masa. Por este motivo, muy probablemente esta cara podría ser más densa.

En un acercamiento visto en la Fig. 4.7c se observan estos abultamientos en forma de cúmulos o fragmentos, orientados en dirección tangencial de color más blanco en la escala de grises (flechas amarillas), poniendo en evidencia cierta discontinuidad. En la Fig. 4.7c, también se observan deformaciones en la pared celular (indicadas con flechas rojas) y el ancho del radio (línea roja).

En una microzona con alta presencia del material de abultamiento, se muestra la conservación de la continuidad del mismo a través de las caras tangenciales (Fig. 4.7d). La línea roja corresponde a la presencia de 2 radios adjuntos (Fig. 4.7d).

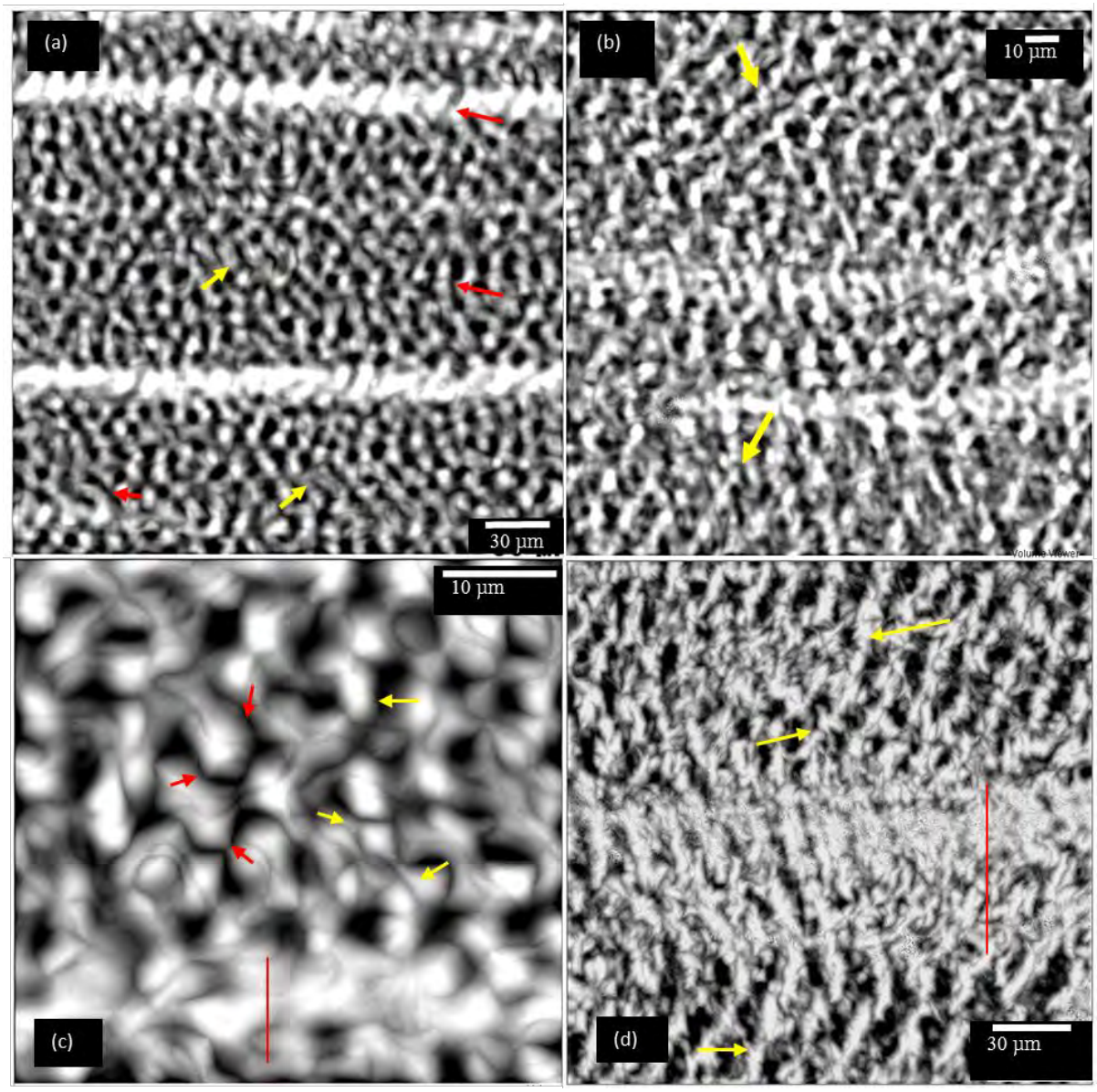


Fig. 4.7. µTC-rayos X de sección transversal de madera *Eucalyptus nitens* Maiden. a) corte con paredes celulares de fibras que presentan deformaciones señaladas con flechas amarillas y con microfisuras sobre las caras radiales señaladas con flechas rojas, los radios medulares aparecen segmentados por contracción en su pared superior en dirección radial, b) orientación de abultamiento (flechas amarillas), c) microgrietas deformadas por esfuerzos en dirección tangencial (flechas rojas), abultamiento fragmentado por contracción sobre la cara tangencial identificado por la intensidad de brillo superior (flechas amarillas), radio medular (línea roja), d) microzona sinuosa de sustancia del abultamiento continua en sección transversal (flechas amarillas), ancho de radio (línea roja).

En el plano Lt (Fig. 4.8a) se observan los abultamientos alineados (flechas amarillas), direccionados entre las paredes de una célula de parénquima de un radio y las paredes de otra célula de parénquima de otro radio. Es decir, se presentan como extensiones que salen de la pared de las células del parénquima radial que comunican a los radios e irrumpen a las fibras

sobre su cara tangencial (Fig. 4.8b).

La Fig. 4.8c es un acercamiento sobre la cara tangencial, aquí se observa el inicio de los abultamientos. Justamente, junto a la pared del radio (flechas amarillas) en dirección perpendicular a este, simulando un tejido horizontal que cruza por en medio de la pared de la fibra. Un aspecto relevante en esta imagen, es precisamente que los abultamientos (flechas amarillas) se observan perfectamente horizontales, sin ser afectados por la inclinación de las fibras. Debido a que tal característica es propia de un cuerpo liquido por efecto gravitatorio, esto es un indicio de que el abultamiento pudiera ser originado por una sustancia líquida presente durante la vida del árbol y actualmente depositada en la madera en forma sólida por la deshidratación. Sin embargo, el confinamiento de tales sustancias, exclusivamente en una misma dirección, en espacios delimitados e intercalados que irrumpen el interior de la pared de las fibras, como lo muestra la Fig. 4.8c, requiere de un espacio de conducción. En el tejido analizado, este medio no es un canal poroso propiamente, amén del nivel microfibrilar, más bien es material que penetra a través de la pared de la fibra. De acuerdo a las imágenes obtenidas, los abultamientos se conforman por una sustancia similar a la observada cubriendo la pared de parénquima. Es de esta manera como la sustancia adquiere el aspecto de un abultamiento tangencial parenquimatoso en las fibras (ATPF).

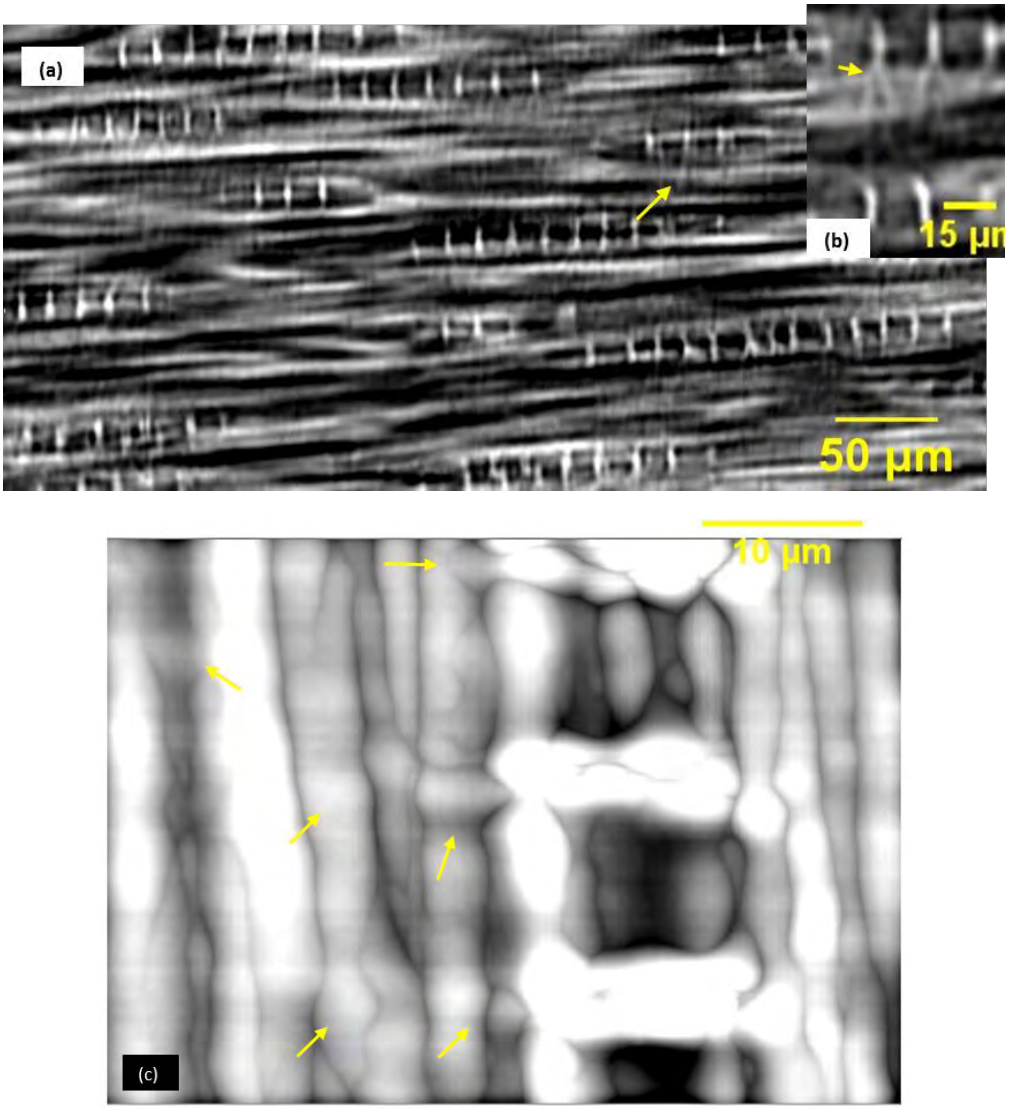


Fig. 4.8. µTC-rayos X de sección tangencial de madera *Eucalyptus nitens* Maiden. a) corte con radios uniseriados, b) líneas de ATPF entre dos radios sobre la cara tangencial (flecha amarilla), c) ATPF entrometido en paredes tangenciales de fibras a partir de pared de célula de parénquima (flechas amarillas).

En el plano Lr (Fig. 4.9a) se observa al ATPF de frente como pequeños puntos alineados (flechas amarillas), que cruzan perpendicularmente la pared de las fibras y simulan puntos paralelos a los radios, aún y cuando son perpendiculares a estos. En los campos donde cruzan la pared de las fibras y la de parénquima radial (Fig. 4.9b) las flechas rojas indican los puntos de inicio del ATPF y se observa a detalle (en círculo) dos segmentos descubiertos de pared de células de parénquima. En contraparte se observa también un recubrimiento en estas mismas células de parénquima, el cual conforma y da origen al ATPF. En esta imagen (Fig. 4.9b) podemos

constatar que al parecer la sustancia que conforma al Abultamiento Tangencial Parenquimatoso en Fibra (ATPF), no es tejido celular de parénquima, se observa que esta sustancia es el recubrimiento de la célula de parénquima y se observa dicha continuidad entre este recubrimiento y el ATPF. Dicho de otra manera, todo el parénquima radial observado en el volumen analizado está cubierto por esta sustancia y no permite ver directamente a la pared de las células cuadradas.

El engrosamiento intercalado de la pared tangencial de las fibras (flechas amarillas) por el entretejido del ATPF se muestra en el acercamiento de la Fig. 4.9c junto al radio (línea roja). El engrosamiento solo en una cara de la pared de la fibra, podría contribuir a tener menor estabilidad dimensional. En general esta condición del tejido muy probablemente incrementa la diferencia de propiedades entre la dirección radial y la tangencial a las fibras de la madera de *Eucalyptus nitens.*

Por otra parte, la pérdida de continuidad en el ATPF observada en el volumen analizado, probablemente puede ser indicador de la diferencia de contracción por el secado entre el ATPF y la pared de la fibra en dirección tangencial, dándose como resultado la concentración de esfuerzos. Al parecer, esta sustancia originalmente líquida y con propiedades segmentantes, tiene un efecto de contracción cuando pasa de estado líquido a sólido durante el secado de la madera, así lo muestran las imágenes obtenidas, donde los radios y las fibras se observan con esta sustancia segmentada. Esto explicaría por qué en la dirección tangencial se presentan los mayores esfuerzos de tensión, capaces de generar grietas con dirección radial en la madera, como se ha encontrado en otras investigaciones para esta especie (Ananías *et al*., 2005; Biechele *et al*., 2009; Valencuela *et al*., 2012b). La supuesta contracción tangencial ejercida por el ATPF, también da explicación congruente a los hundimientos (colapso) sobre el plano Lr reportados en el *Eucalyptus nitens* durante el secado (Rozas *et al*., 2005; Garibay, 2015)

En la Fig. 4.9d se muestran las puntuaciones de las fibras en un corte radial y un acercamiento en la Fig. 4.9e. El contraste entre la gran cantidad del borde de la puntuación resaltado virtualmente y los pequeños orificios conductores de las puntuaciones puede dar lugar a importantes cambios dimensionales en estos bordes del tejido y obstruir los pequeños conductos, durante procesos de infiltración como la preservación de la madera. En esta misma imagen se percibe tenuemente lo que parece ser la orientación de cúmulos de microfibrillas en las capas de la pared.

Por otra parte, en el acercamiento de la Fig. 4.9f se observa que el origen de las microgrietas encontradas en la sección transversal del tejido se presentó sobre la cara radial de las fibras. La falla se presenta como una serie de fragmentos verticales de pared de fibra. Por su aspecto en la imagen, probablemente surge de la separación de la capa S2 por tensión perpendicular, ya que se presentó como un tipo de desgarramiento laminar paralelo (flechas amarillas) a la disposición longitudinal de las microfibrillas en esta capa, observándose un remanente sin desgarramiento con un nivel de gris inferior que la capa desgarrada, al parecer correspondiente al resto de la pared. En otras investigaciones realizadas a madera de eucalipto se detectaron esfuerzos en esta misma dirección del tejido y fueron atribuidos a la liberación de tensiones de crecimiento y se detectó a la capa S2 con módulo de elasticidad distinto a la madera sin tensión (Gacitua *et al*., 2007) y una diferencia entre capas de la pared celular en sus propiedades mecánicas (Valenzuela *et al*., 2012b). En la presente investigación se observa como estas microgrietas se desarrollan sobre la cara radial (línea roja) y limitan con el cruce de la pared tangencial (línea amarilla), la cual presentó mayor espesor. Este tipo de desgarramiento en la cara radial (Fig. 4.9f) a partir de esfuerzos de tensión perpendicular a la fibra en dirección radial, puede darse a partir de las distintas propiedades mecánicas entre capas de la pared celular reportados en otras investigaciones (Valenzuela *et al*., 2012b).

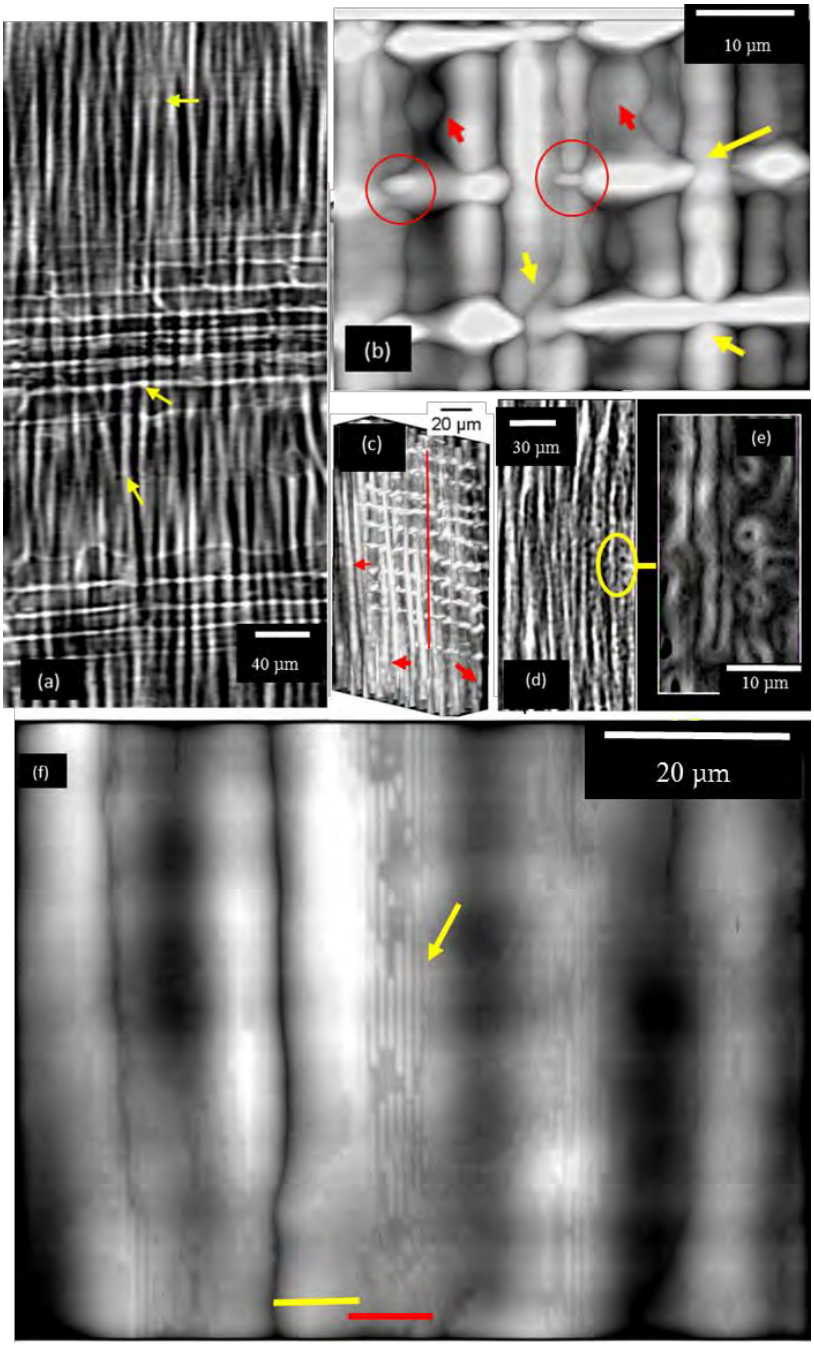


Fig. 4.9. µTC-rayos X de sección radial de madera *Eucalyptus nitens* Maiden. a) rebanada radial con puntos de intersección entre el ATP y la pared de fibra, vistos como hileras de puntos paralelos a los radios, al lado de campos de cruzamiento (flechas amarillas) o en medio de las células de parénquima, b) cruzamiento entre pared de fibra y de parénquima (flecha amarilla), ATP unido con recubrimiento de parénquima (flecha roja), pared de parénquima sin recubrimiento ATP (círculos), c) imagen 3D de engrosamientos en la pared tangencial por el ATP (flecha amarilla), radio con ATP de parénquima fragmentadas por contracción radial (línea roja), d) fibras con puntuaciones sobre la cara radial con dirección tangencial, e) pequeños orificios conductores de las puntuaciones (flechas amarillas) en contraste con la gran cantidad de bordes resaltados de pared celular, f) microfisuras por desgarramiento laminar paralelo a la disposición longitudinal de las microfibrillas (flecha amarilla) sobre la cara radial de la fibra (ancho de línea roja), extremos de la cara radial donde cruza perpendicularmente la cara tangencial reforzada por el ATP (ancho de línea amarilla).

En la Fig. 4.10a se presenta un corte virtual de la reconstrucción tridimensional del Abultamiento Tangencial Parenquimatoso en Fibra (ATPF), en él se observa como los segmentos en la fibra (SF) de ATPF y los segmentos en parénquima (SP) forman una misma red tridimensional distribuida en todo el tejido, intercaladas a lo largo de las fibras, sobre las caras tangenciales, formando toda una microestructura que pudiera tener influencia directa en las propiedades fisicomecánicas de la madera.

En la Fig. 4.10b corresponde a la selección dentro del histograma de intensidad de brillo de la imagen activa. Se seleccionó el mismo rango de los valores para los diferentes cortes analizados, el cual correspondió al nivel de brillo del histograma que representa al ATPF. En la parte derecha de la imagen se encuentra la imagen activa analizada con la ubicación de los cortes virtuales realizados transversalmente. El resultado del análisis con esta herramienta demostró de manera cualitativa la relación del ATPF con la presencia de los radios medulares.

El corte número 1 (Fig. 4.10c) se encuentra entre la presencia de 3 radios (líneas rojas), y se puede observar la cantidad abundante de ATPF en las zonas de radios y fibras.

Para el segundo corte (Fig. 4.10d) ubicado entre dos radios, la cantidad de ATPF se mantiene abundante pero disminuyó respecto del primer corte. El resultado del corte número 3 (Fig. 4.10e) ubicado a la altura donde solo existe un radio y sobre la pared horizontal de la célula de parénquima, disminuyó considerablemente la presencia de ATPF. Para el corte número 4 (Fig. 4.10f) ubicado a un lado del corte 3 y al centro de la célula de parénquima, con la presencia de un solo radio medular, la cantidad de ATPF se mantuvo prácticamente igual respecto del corte 3. Finalmente en el corte número 5 (Fig. 4.10g), ubicado al final en la punta del radio medular, la presencia del ATPF disminuyó considerablemente respecto de todos los cortes anteriores, mostrándose prácticamente ausente, por la ausencia de radios medulares.

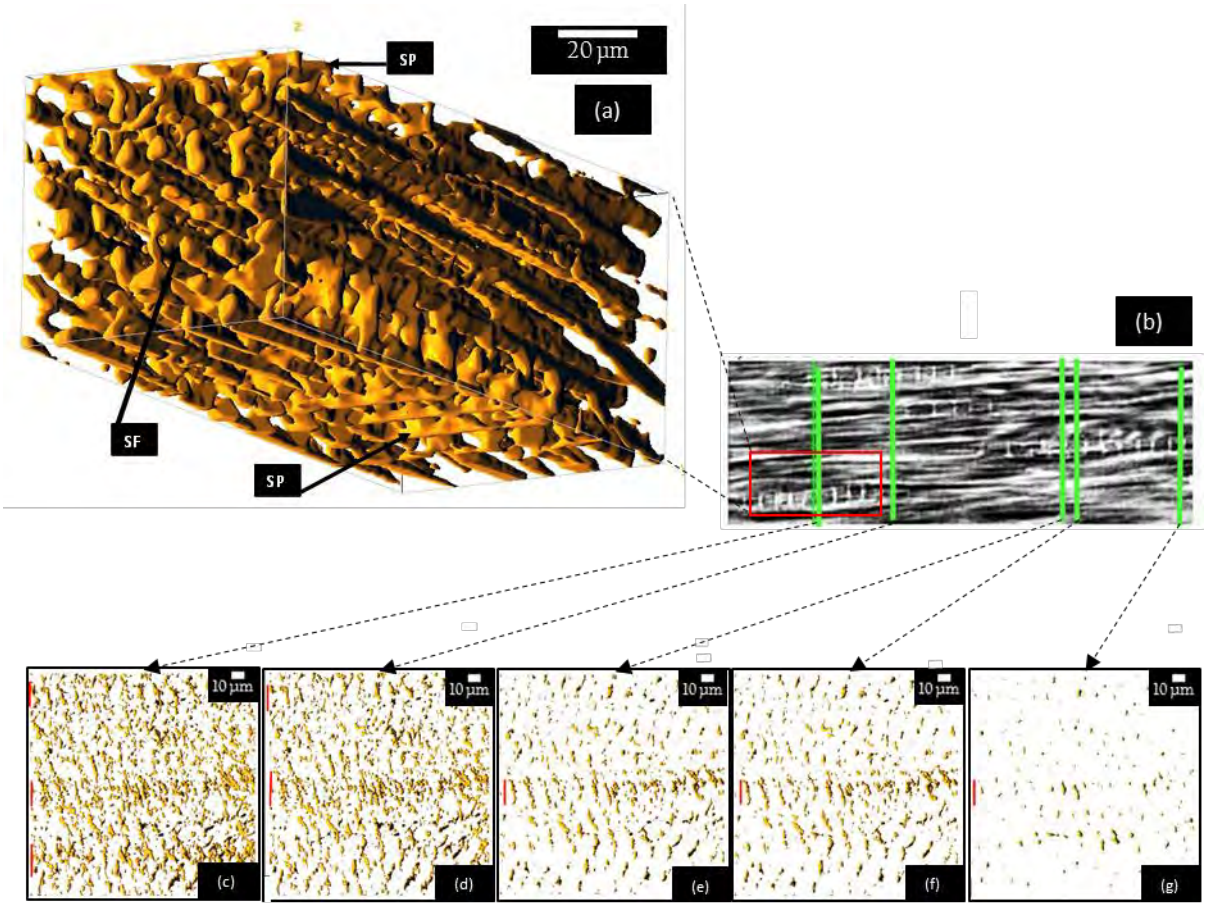


Fig. 4.10. Imágenes de la relación de ATPF con los radios medulares de madera *Eucalyptus nitens* Maiden. a) corte virtual de la reconstrucción tridimensional del ATPF, b) cortes transversos seleccionados, c) corte entre 3 radios, d) corte entre 2 radios, e) corte sobre pared de 1 radio, f) corte en medio del radio, g) corte hacia el final de 1 radio.

La interconexión entre los espacios porosos del tejido, se muestran en las imágenes de la Fig. 4.11 como agrupamientos del mismo color. Las flechas negras señalan a los radios medulares. En la Fig. 4.11a se observan los agrupamientos de lúmenes de fibra interconectados principalmente con lúmenes del radio, en franjas paralelas a este. El alcance de interconexión a los costados del radio es limitado y sobre todo no se entremezclan con las franjas contiguas, mostrando incluso franjas intermedias multicolor menos anchas, que se observan como aisladas sin interconexión contigua y que funcionan como barreras entre las distintas regiones que si presentan una interconexión (Figs.4.11b y 4.11c). En la Fig. 4.11c también se observa que al final de la parte superior del radio en color rojo, se interrumpe casi abruptamente la interconexión, es decir, también se observa limitada arriba y debajo de los radios. Esta forma de interconexión en la porosidad muestra una organización que beneficia el flujo de los fluidos a través de los radios, pero que al mismo tiempo tiene zonas de porosidad aisladas que pudieran

presentar problemas en la conducción de los fluidos, originando con esto problemas en el tejido como los presentados por esta especie durante el secado.

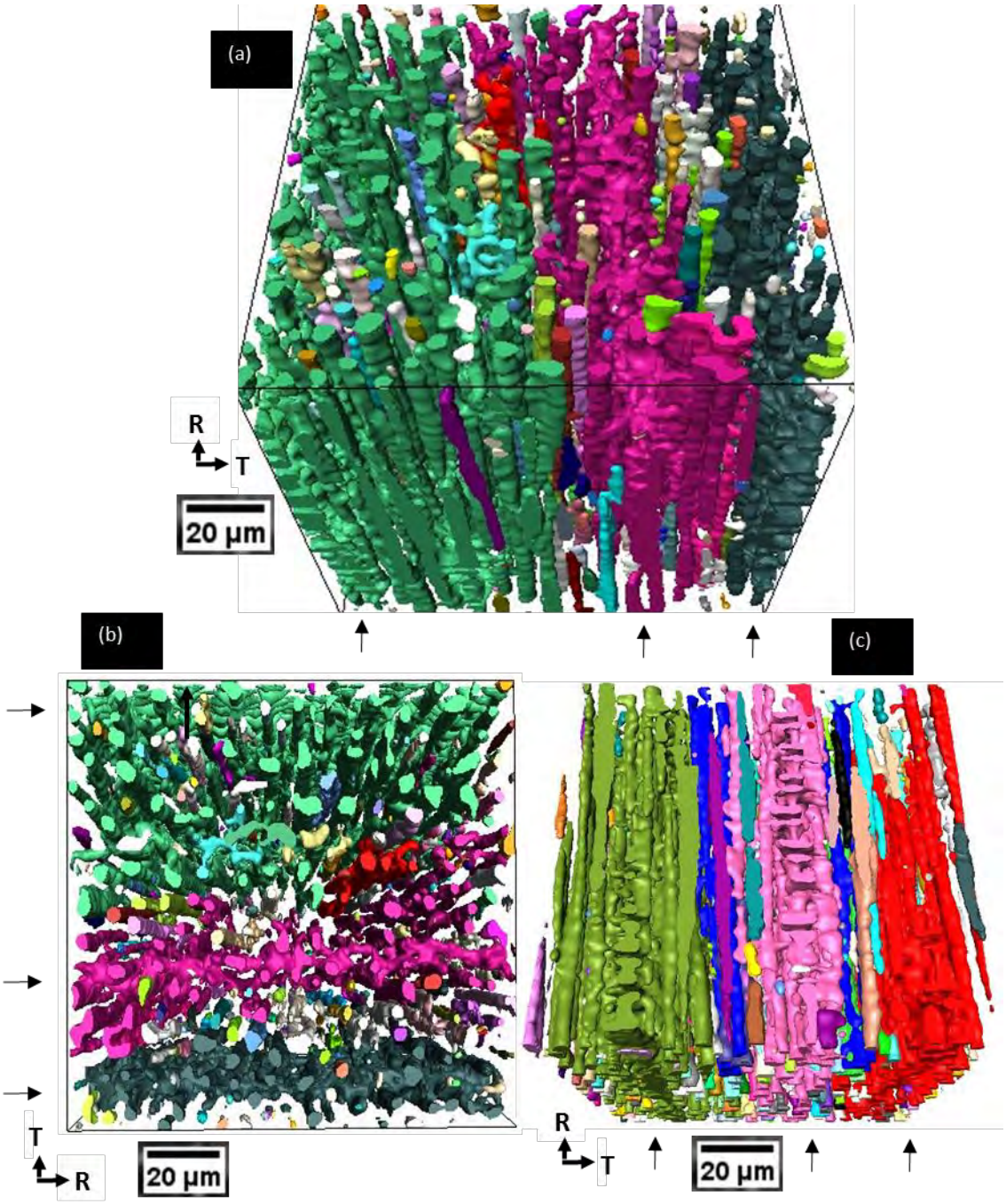


Fig. 4.11. Imágenes de conectividad 3D fase porosa de madera *Eucalyptus nitens* Maiden. a) conectividad en capas, b) conectividad de fibras entorno a los radios, c) capas intermedias no conectadas. Flechas negra= radios, T= dirección tangencial y R= dirección radial.

En el tratamiento de segmentación de las distintas fases de interés en el tejido, se obtuvieron inicialmente sobreestimaciones que se reflejaron directamente al momento de realizar las mediciones en la microestructura. Esto debido a la aplicación de los distintos métodos automáticos donde se obtuvieron umbralizaciones que no se ajustaron adecuadamente al tejido en todos los casos, como lo muestra la Fig. 4.12a, en donde se observa un ejemplo de un corte virtual con las imágenes binarias obtenidas en cada método aplicado, con su fase porosa y fase sólida que no corresponden al tejido original.

En la aplicación de los métodos semiautomáticos y el manual, los resultados no fueron los más óptimos para poder realizar las mediciones en la microestructura. En la Fig. 4.12b se muestran las imágenes binarizadas por estos métodos del mismo corte virtual utilizado en la imagen anterior. Los resultados muestran sobreestimación en la umbralización de las distintas fases. Sin embargo, la umbralización por el método semiautomático Sauvola, dio como resultado una óptima umbralización del tejido celular y la fase porosa. Este método tiene la ventaja de utilizar umbralizaciones locales en cada pixel, que consideran la media y la desviación estándar de un radio especificado (Sauvola & Pietikäinen, 2000).

En la Fig. 4.12c se muestra la comparación entre el corte ejemplificado radial y tangencial y sus imágenes binarizadas por el método Sauvola. En las imágenes binarias se observa cómo se conserva adecuadamente la porosidad, esto fue fundamental al momento de realizar los análisis geométricos y las simulaciones de flujo de fluido computacionales.

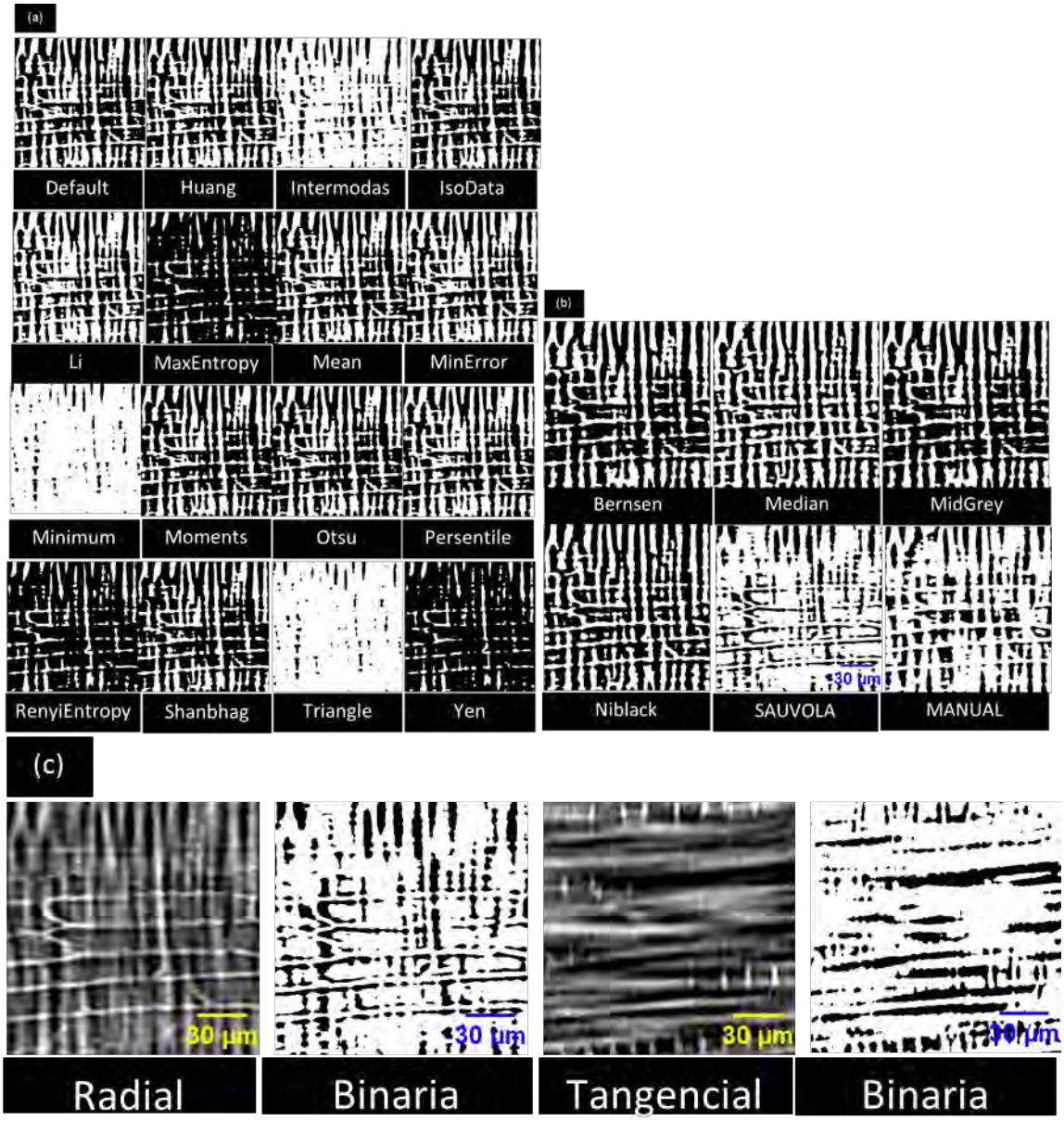


Fig. 4.12. Binarizacion de imágenes de *Eucalyptus nitens*. a) corte radial binarizado por métodos automáticos, b) Corte radial binarizado por métodos semiautomáticos y manual, c) Corte radial y tangencial en escala de gris binarizado por el método Sauvola.

En la Fig. 4.13 se muestra un ejemplo de la representación 3D de la fase sólida y porosa de la madera, obtenida de las imágenes binarias y sobre las cuales fue medida la fracción en volumen de estas, Fig. 4.13a y Fig. 4.13b muestran la fase sólida y porosa, respectivamente. Por su parte en los cortes virtuales de la fase porosa se muestra a detalle cómo en las imágenes binarias se conservó una adecuada segmentación de fases. En la Fig. 4.13e se pueden ver las uniones

intercaladas en las esquinas del lumen de células de parénquima radial, correspondientes a puntuaciones de parénquima, de igual forma, en la Fig. 4.13f se observan los conductos que unen a los lúmenes de las fibras, los cuales corresponden a las cavidades de las puntuaciones en fibras. Esto último confirma la posibilidad de realizar mediciones a nivel de puntuaciones, con el tamaño de voxel empleado en esta investigación para esta especie. La Fig. 4.13d corresponde a la fase de las puntuaciones. En la Fig. 4.13c se proyecta la representación 3D de la fase sólida que corresponde a la estructura anatómica con mayor intensidad de brillo, esto representa a la fracción del ATPF, que coincide con las caras tangenciales de las fibras y las paredes de las células de parénquima radial, el resto del tejido quedó fuera de la umbralización y no aparece en la Fig. 4.13c, por lo que se segmentó un tejido con paredes tangenciales únicamente.

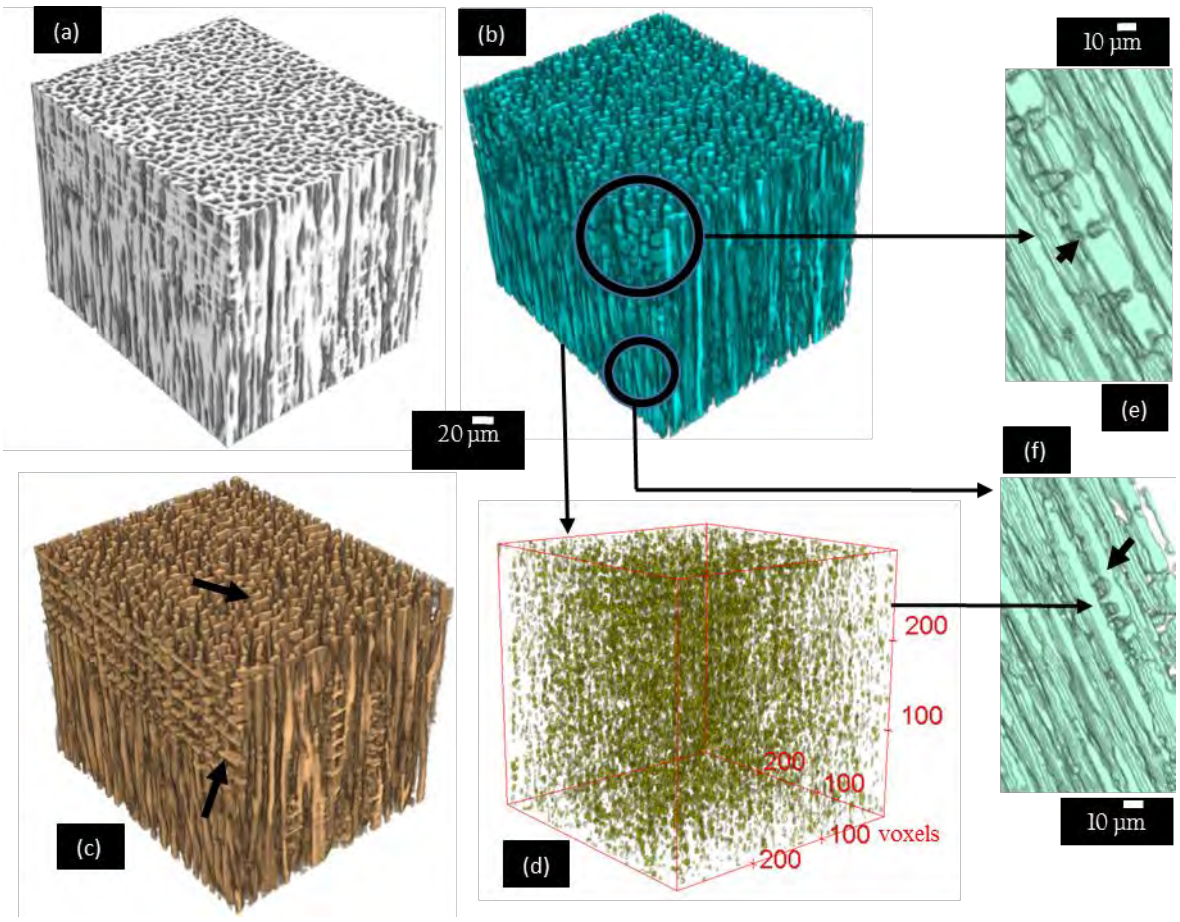


Fig. 4.13. Imágenes binarias de madera *Eucalyptus nitens* obtenidas con µTC rayos-X. a) fase sólida, b) fase sólida en dirección tangencial, c) fase porosa, d) conectividad entre puntuaciones de parénquima, e) conectividad entre puntuaciones de fibra, f) fase porosa de puntuaciones. L= dirección longitudinal, T= dirección tangencial y R= dirección radial.

4.4.2 Caracterización geométrica-microestructural

Los resultados de las mediciones de intensidad de brillo vistas en la escala de grises para imágenes de 8 bits, reflejaron el nivel de atenuación sufrido por el haz de rayos X al pasar por el tejido leñoso. Esto corresponde a voxeles con menos luminiscencia (negros) en los sitios donde el haz cruzó prácticamente sin atenuación, debido a la baja densidad de la materia y a voxeles más luminosos en los sitios donde el haz presentó la mayor atenuación por la elevada densidad de la materia. Esto permitió distinguir con la escala de grises, los cambios de densidad en la microestructura de la madera. Aun cuando esta medición no permite obtener un valor de la densidad directamente, se observan los cambios originados por esta causa.

En la Fig. 4.14a, se muestra un corte virtual transversal de la madera con las rutas de las mediciones de intensidad de brillo sobre el tejido, las cuales son señaladas con líneas amarillas y con el inciso de su histograma. Para las 4 rutas trazadas sobre las paredes radiales de las fibras, los resultados muestran un histograma muy similar (Fig. 4.14b, 4.14c, 4.14d, 4.14e). Al cruzar sobre los radios medulares se alcanzan los picos más altos con valores arriba de los 200 niveles de gris, excepto en la ruta “d” en donde finaliza muy cerca del radio (Fig. 4.14d) y el valor está por debajo de 200. Los valores más bajos inferiores a 50 corresponden a los cruces de los lúmenes de las fibras, mientras que los correspondientes a la pared radial de las fibras concentran sus valores en un rango de 80-150.

En la Fig. 4.15a trazada con 5 rutas distintas sobre la pared tangencial de la fibra y una ruta más sobre el radio medular, se obtuvieron distintos resultados. Para la Fig. 4.15b y 4.15c trazadas sin pasar por los lúmenes, se obtuvieron picos de 120-150 niveles que corresponden a los cruces con pared radial y picos entre 190-250 niveles correspondientes a la pared tangencial y los cruces con el radio. En las fig. 4.15d, 4.15e y 4.15f, trazadas pasando sobre la ruta de los poros, los picos están en su mayoría cercanos a 250 y escasamente a los 170, esto como resultado de que no se cruza sobre la pared radial. Para la trayectoria sobre el radio medular (Fig. 4.15g), el histograma se mantiene con los picos casi constantes sin dispersión, debido a la ruta sobre la sustancia que recubre al radio. Ésta marcada diferencia entre la pared radial y tangencial nos dimensiona lo alejadas que están sus densidades, como resultado de la presencia del ATPF en el tejido y nos ayudan a estimar en qué medida pudiera afectar sus propiedades.

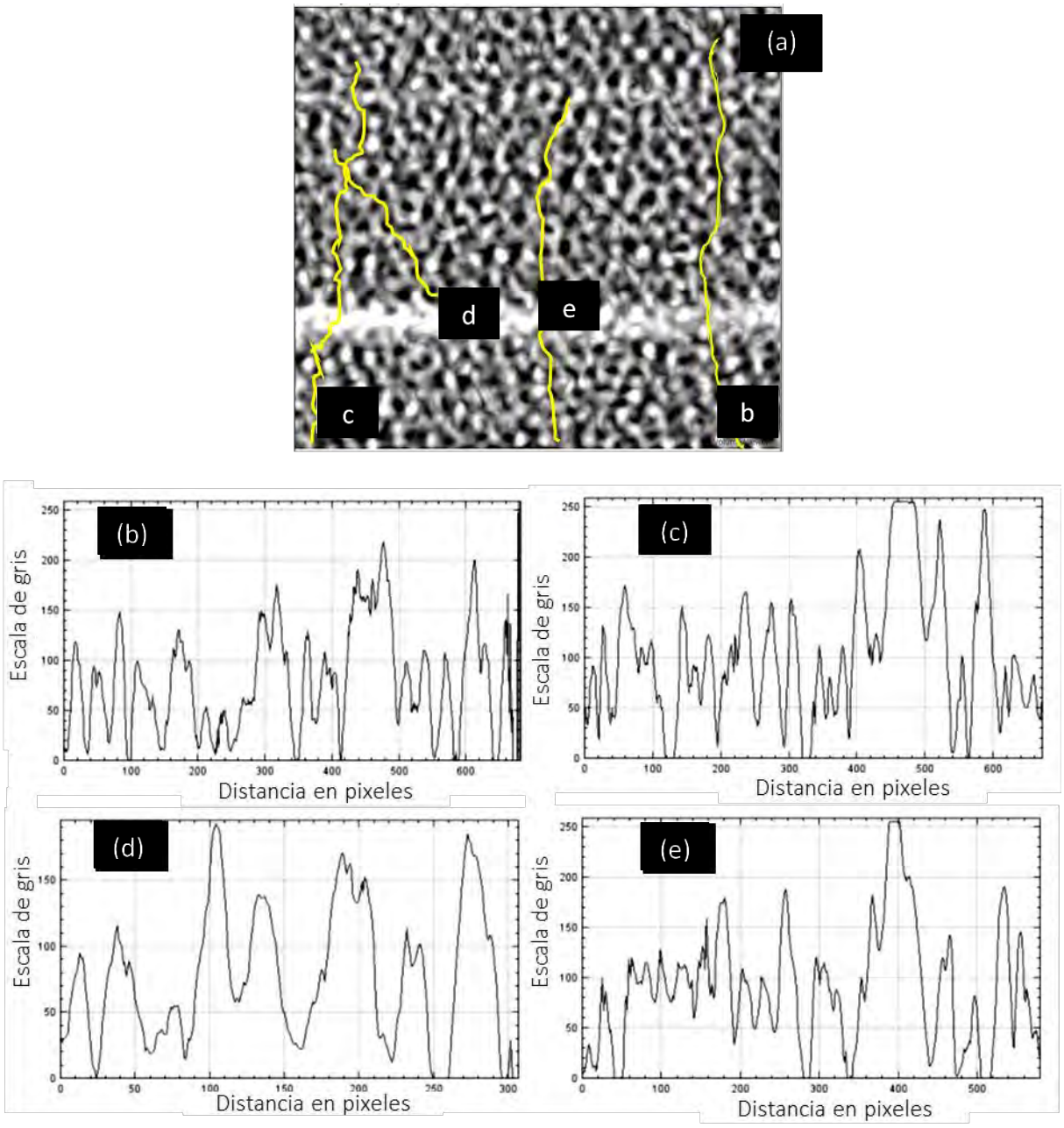


Fig. 4.14. Trazados de nivel de brillo en corte transversal de *Eucalyptus nitens* Maiden. a) Corte de trazado, b) Histograma de trazado b, c) Histograma de trazado c, d) Histograma de trazado d, e) Histograma de trazado e.

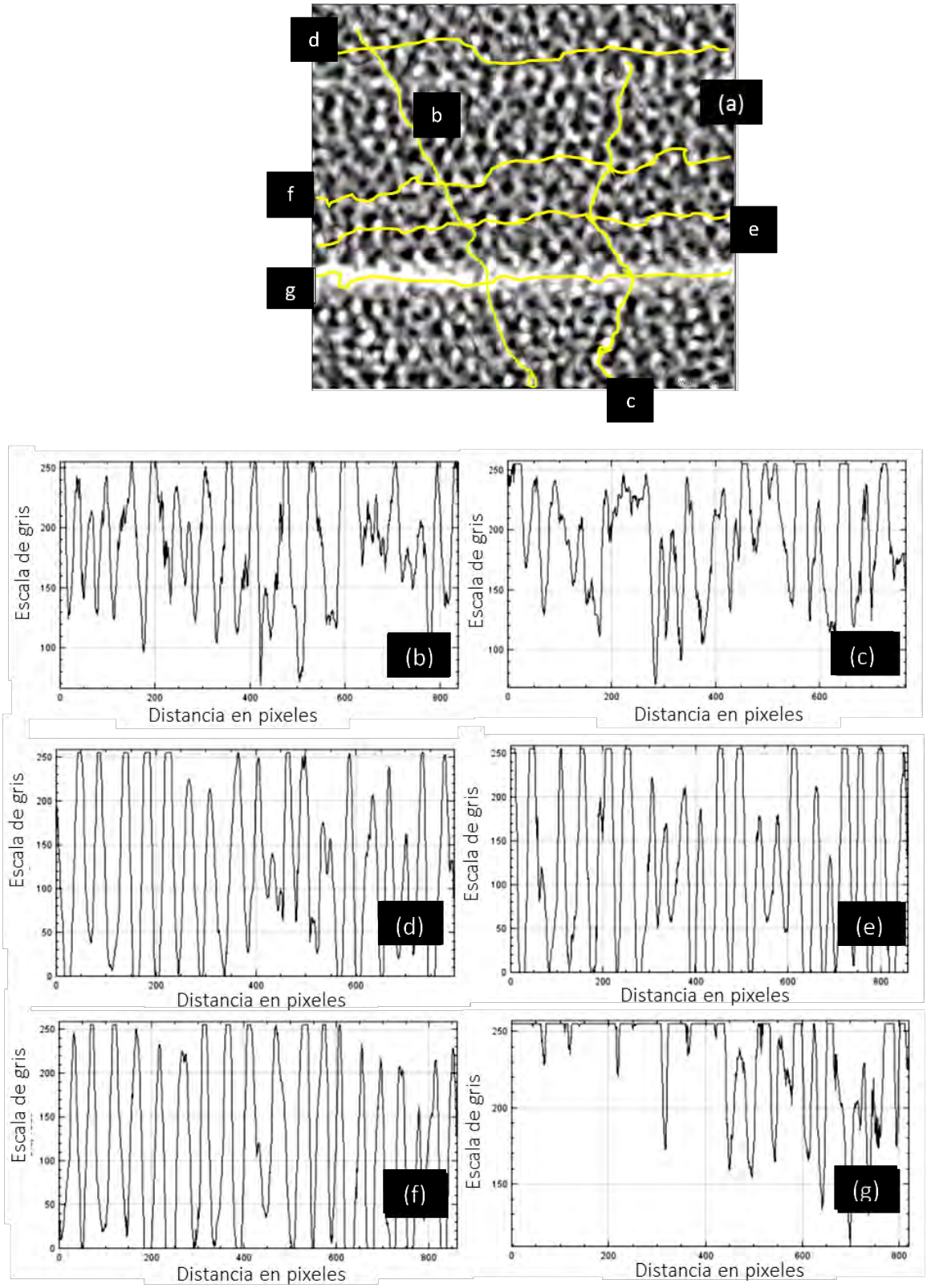


Fig. 4.15. Trazados de nivel de brillo en corte transversal de *Eucalyptus nitens* Maiden. a) Corte de trazado, b) Histograma de trazado b, c) Histograma de trazado c, d) Histograma de trazado d, e) Histograma de trazado e, f) Histograma de trazado f, g) Histograma de trazado g.

Los valores geométricos anatómicos obtenidos de los tres volúmenes analizados de madera de *Eucalyptus nitens* se muestran en los Cuadros 4.2 y 4.3. El espesor de pared celular mostró una distribución de valores (Fig. 4.16) concentrados en 2.5 µm (20.2-22.5%), 3 µm (16.3-16.6%), 2 µm (16.5-19.4%), 3.5 µm (12.4-13.8%), 1.5 µm (7.3-6.4%), 4 µm (8.5-10.4%), 1 µm (1.9-2.1%), 4.5 µm (5.1-6.6%), 5 µm (2.5-3.7%), 5.5 µm (1.3-1.6%), y el resto con valores extremos inferiores al 1%, teniendo como punto crítico el 0.4% que corresponde a segmentos de pared sobre la cara radial con 0.5 µm de espesor; En los tres cortes se presentaron los mismos espesores de pared, pero en el corte más alejado del vaso (C3) resultó ligeramente mayor la cantidad de paredes gruesas y con menor cantidad en el corte (C1) ubicado a un costado del vaso. La media de espesor de pared (2.92 µm) se aproxima en buena medida a la reportada por Garibay (2015), para esta especie de 1.2 y 3.7 µm y de 2.10 µm por Kibblewhite *et al.* (2000), en donde se utilizaron métodos convencionales 2D para su medición.

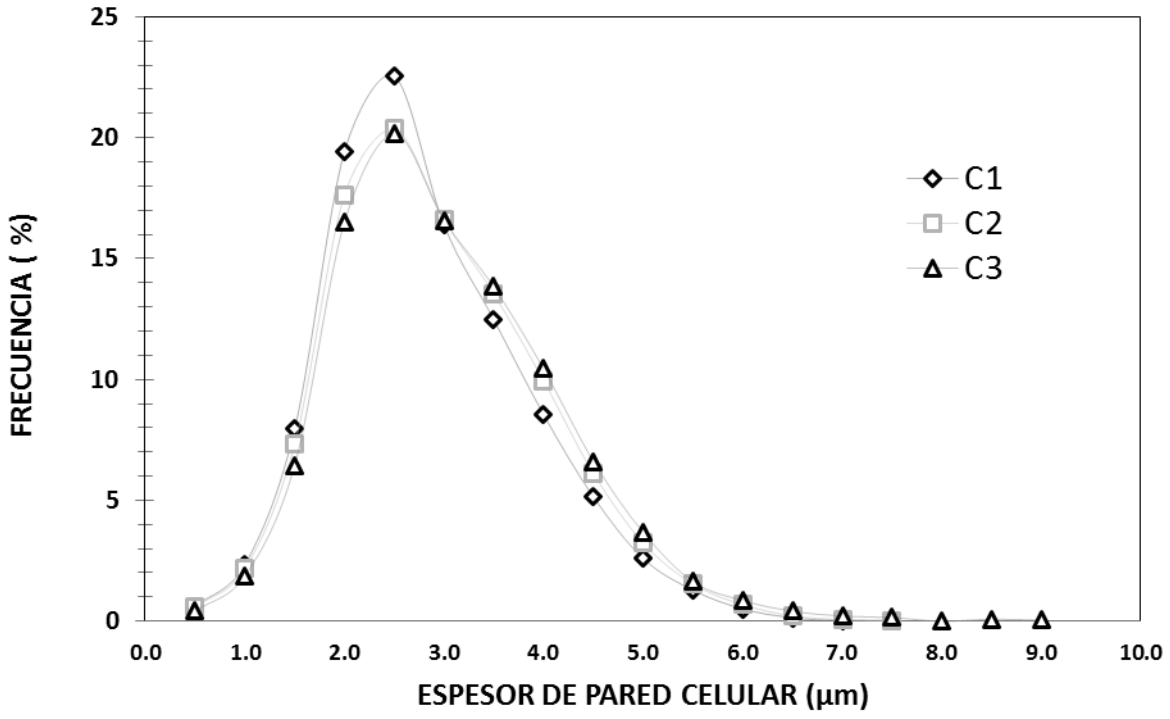


Fig. 4.16. Distribución de espesor de pared celular en imágenes µTC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. C1, C2, C3 = secciones virtuales.

La distribución del área del lumen de fibra resultó inversamente proporcional, es decir a mayor

área de poro menor cantidad del mismo en los 3 cortes, con concentraciones de 3.7% para áreas de 1.75 µm² y de 0.5% para 15.68 µm² (Fig. 4.17). Por su parte, se obtuvieron valores dentro del mismo rango para los tres cortes, con un aumento en la media de 6.69 a 6.81 µm² de C2 menor al 2%, el cual corresponde al corte ubicado frente al vaso en dirección radial, con lo que genera un aumento, en iguales proporciones, en el diámetro total de la fibra en este punto, ya que el espesor de pared es similar en los 3 cortes; estos mismos sitios fueron identificados en anteriores estudios como puntos de concentración de esfuerzos. La alta desviación estándar muestra el alto grado de heterogeneidad en el tamaño de las fibras dentro del rango señalado.

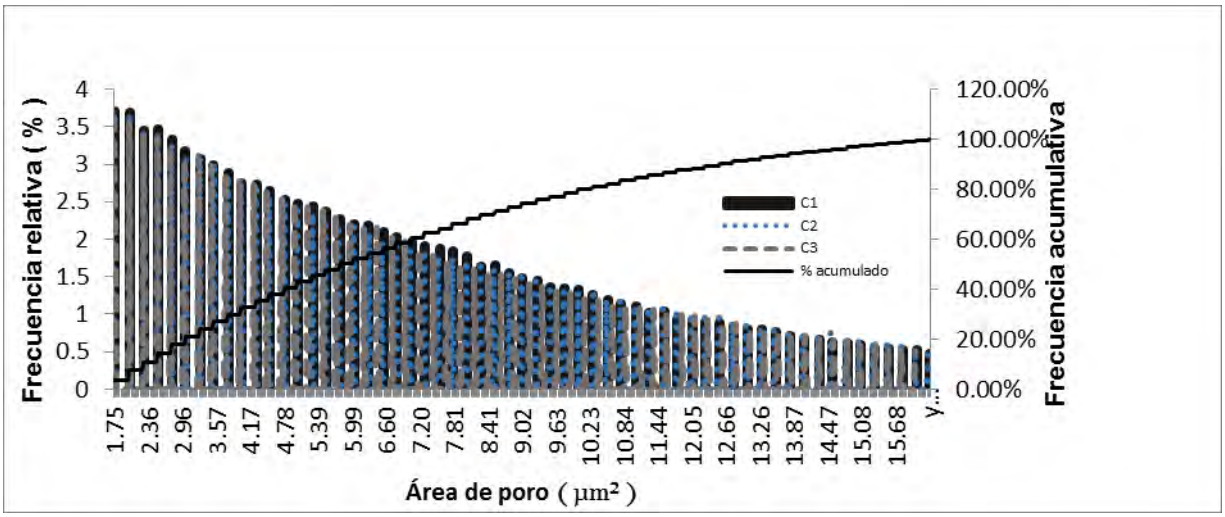


Fig. 4.17. Distribución de área en poro de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. C1, C2, C3 = secciones virtuales.

El valor más recurrente de la circularidad de los poros (en fibra) fue del 0.99 con el 23.1, 23.2 y 21.90% para C1, C2 Y C3 respectivamente, estos porcentajes representan la fracción de volumen de lúmenes sin deformación en una circularidad ideal; el resto de la distribución tiene concentraciones considerablemente menores (Fig. 4.18), pero representa el porcentaje (78%) de lúmenes con cierto grado de deformación o de microgietas que unen a 2 o más lúmenes; los mínimos alcanzaron valores del 0.137, lo que indica lúmenes con aplastamiento casi total. La media fue igual en los tres cortes con un valor de 0.8 (Cuadro 4.2). Los valores más bajos de este parámetro se presentaron en las microgrietas deformadas por contracción, ya que es en donde se observan los lúmenes con mayor grado de aplastamiento.

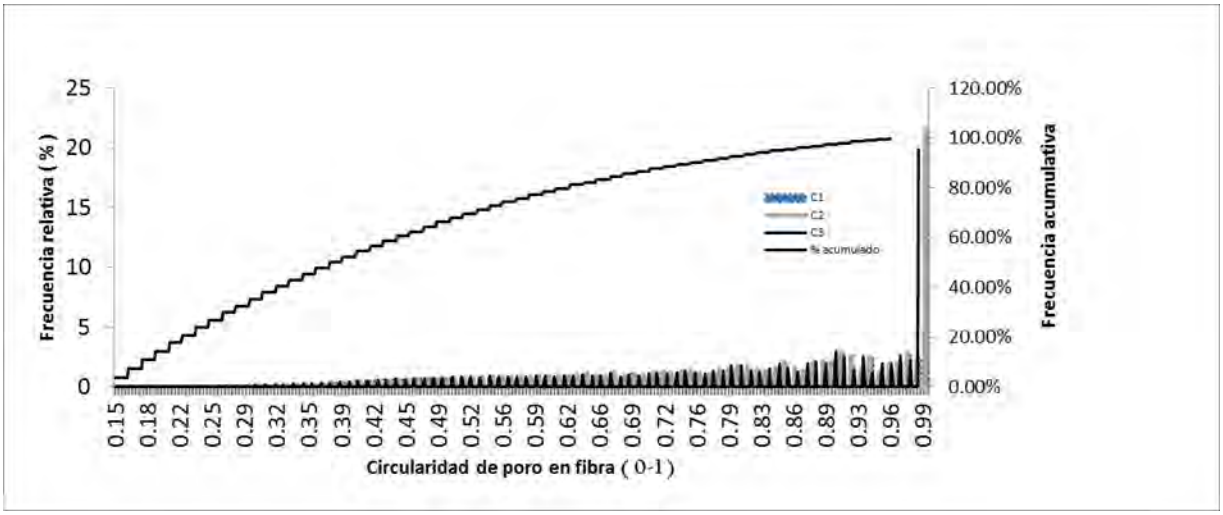


Fig. 4.18. Distribución de circularidad en poro de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. C1, C2, C3 = secciones virtuales.

La solidez presentó una media de 0.82 para los tres cortes (Cuadro 4.2), con mayor concentración de valores en torno a la media (Fig. 4.19) y, en consecuencia, menor desviación estándar que la circularidad, esto resulta de una pared celular más homogénea en este parámetro. No obstante, al grado de deformación asociado al 0.82, se agrega una serie de valores correspondientes a mayor deformación, extendiéndose hasta una solidez mínima de 0.32 y de acuerdo a estos resultados, el tejido cerca del vaso, así como el de mayor distancia con este, presentaron la misma solicitación de esfuerzos en algún momento durante el secado y la misma deformación; esto pudiera ser un efecto de la contracción del ATPF en el tejido, por efecto de la presencia de los radios, como se observó anteriormente, y no de la presencia de vasos.

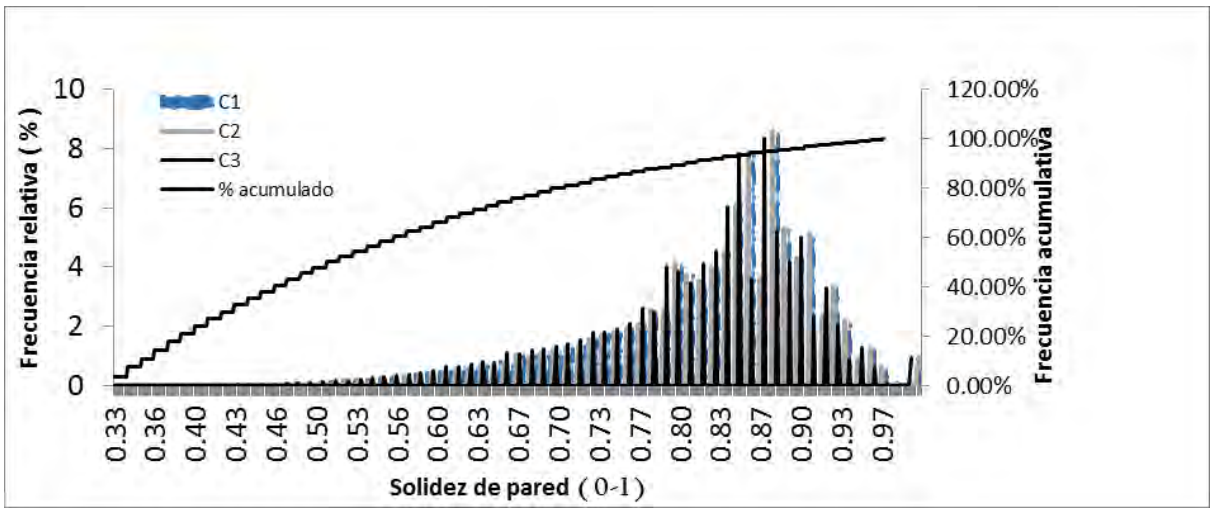


Fig. 4.19. Distribución de solidez en pared de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. C1, C2, C3 = secciones virtuales.

Al igual que en el área del lumen, el diámetro de Feret y el diámetro mínimo de Feret mostraron la heterogeneidad del tamaño de fibra con un alto valor de desviación estándar. Los valores resultaron similares en los tres cortes y alejados del extremo máximo (Figs. 4.20 y 4.21), con una media de 4.1 µm en el diámetro de Feret y de 2.4 µm (Cuadro 4.2) en el diámetro mínimo de Feret. El valor del diámetro de Feret se aprecia por arriba del diámetro mínimo, debido a que este parámetro está fuertemente influenciado por la deformación en los poros, su valor es aproximado al reportado por Garibay (2015), de 5.6 µm. El histograma del diámetro mínimo de Feret muestra claramente 6 tamaños de poros característicos. En los 2 principales tipos de diámetros de 2.45-2.46 µm, en los tres cortes ocupan hasta el 16.12% y para 2.5 µm, el 15.00-15.35%. La media en el diámetro coincide con los reportados para esta especie en la literatura (Garibay, 2015).

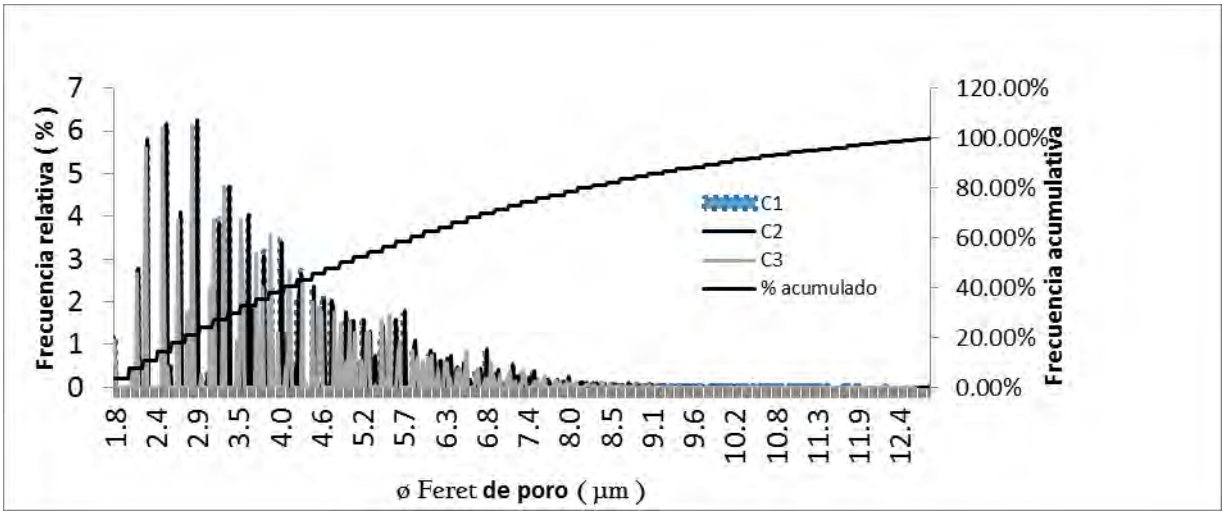


Figura 4.20. Distribución de diámetro de Feret en poro de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. C1, C2, C3 = secciones virtuales.

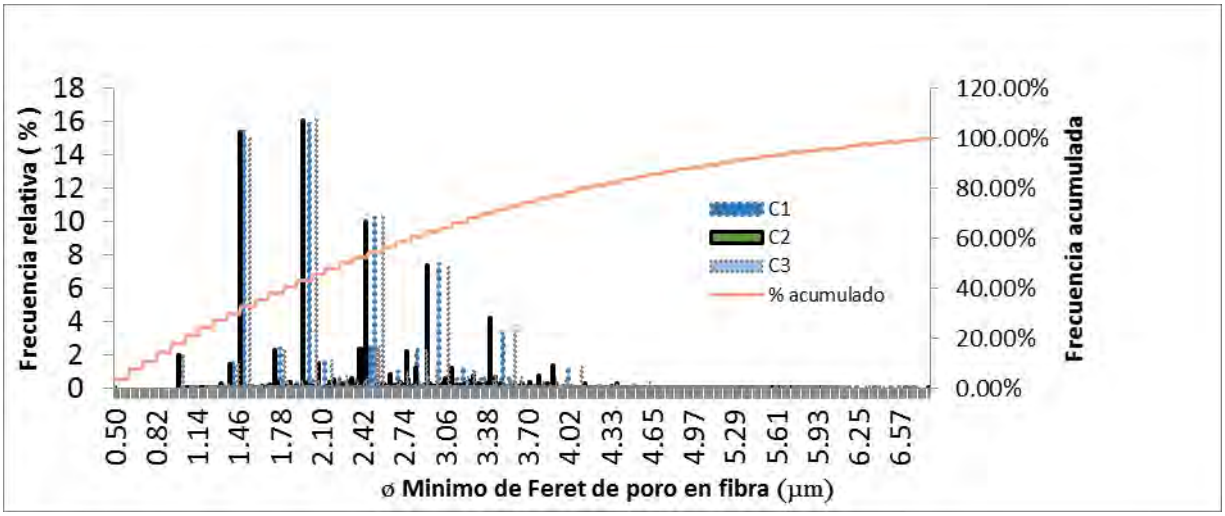


Fig. 4.21. Distribución de diámetro mínimo de Feret en poro de fibra, en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden. C1, C2, C3 = secciones virtuales.

El diámetro mínimo de Feret de las puntuaciones fue muy similar al medido en las direcciones radial o cara tangencial (Figs. 4.22 d,f,g) y dirección tangencial o cara radial (Figs. 4.23 d,f,g), de entre 0.5 y 3.2 µm, con una distribución que identifica 4 tipos de diámetros distintos, de 0.50 µm (33.6%), 0.98 µm (29.5%), 1.49 µm (20.0%) y 1.97 µm (9.3%). Al igual que en la porosidad de la fibra, las puntuaciones también presentaron una distribución inversamente proporcional, a mayor tamaño menor cantidad. Esta mayor proporción de los orificios más reducidos (0.50 µm)

es una limitante proporcional durante el secado, probablemente este es uno de los motivos que han dificultado el secado en esta especie. En este parámetro se obtuvo una media de 1.0 μm, la cual resulta muy baja en comparación con otras especies.

La distribución del área en las puntuaciones también se presentó inversamente proporcional y en 4 principales clases para C1, C2 y C3 por igual. Sin embargo, al parecer este parámetro es más sensible a los cambios dimensionales y sí detectó diferencias entre las puntuaciones de la dirección radial y tangencial. En la radial, la media resultó entre 1.67-1.76 μm^2 (Figs. 4.22 a,b,c) y en la dirección tangencial de 1.81-1.88 μm^2 (Figs. 4.23 a,b,c). Las áreas obtenidas de las puntuaciones también son muy reducidas en las 2 direcciones.

Por su parte, la fracción de volumen máxima ocupada por las puntuaciones para C1, C2 Y C3 fue de 0.82 % sobre la cara radial (dirección tangencial) y de 0.76 % para la tangencial (Cuadro 4.3), que sumadas escasamente es un 1.58 %, la proporción de este valor sobre el volumen total nos ayuda a estimar la alta dificultad para el flujo de fluido entre las fibras de la madera, una condición importante durante el secado y la preservación de la madera.

Las fracciones de volumen en los tres cortes resultó muy similar (Cuadro 4.3), con 83.86 y 16.14 % en fase leñosa y porosa respectivamente, la elevada fracción del tejido indica la elevada disposición por unidad de volumen para soportar esfuerzos en esta especie. Sin embargo, esta relación es condicionada finalmente por la existencia de vasos en el tejido y se modifica en la medida de la fase porosa de vasos presentes.

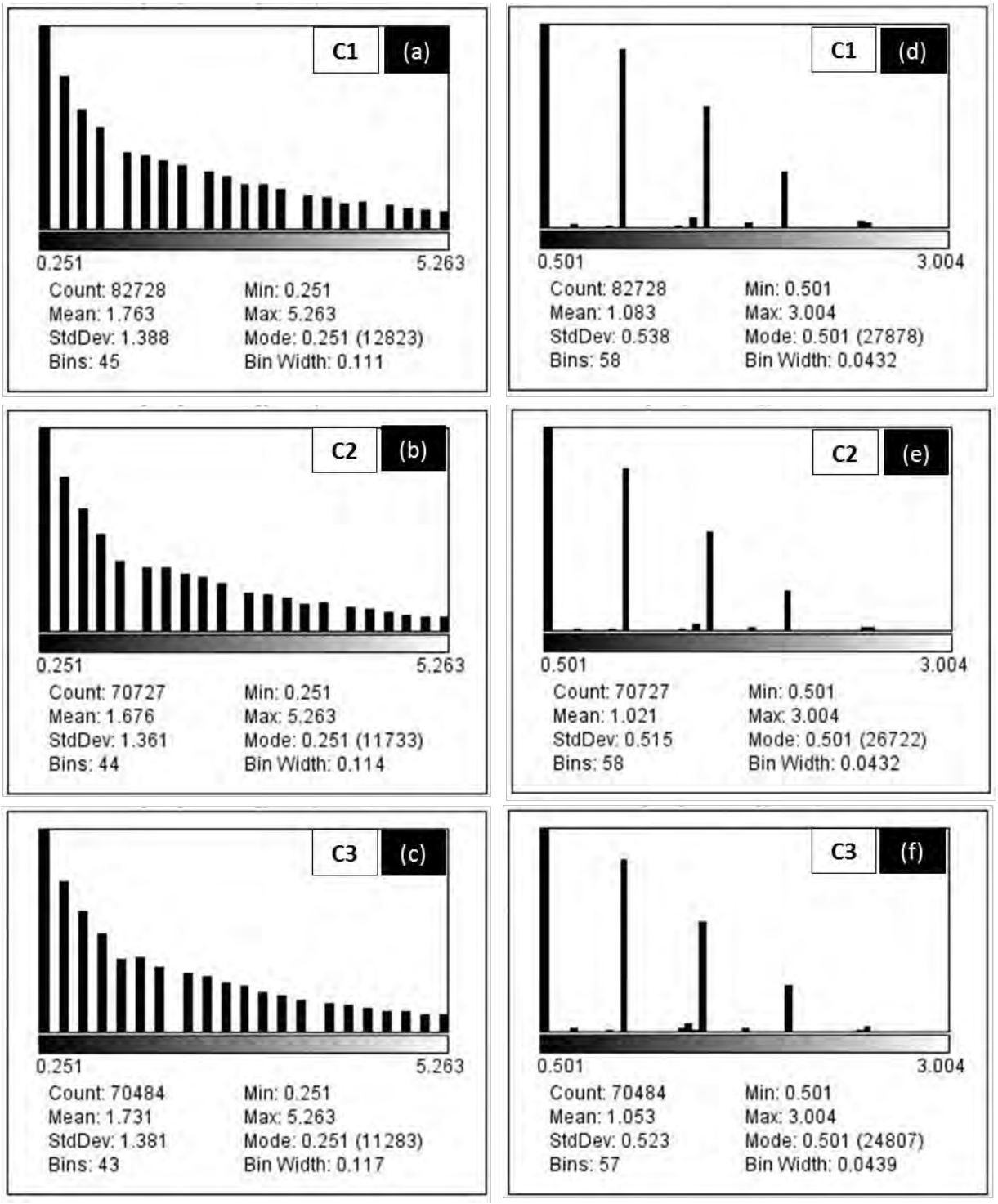


Fig. 4.22. Distribución de área en poro de puntuación de fibra (a, b, c) y de diámetro mínimo de Feret de poro en puntuación, de fibra (e, f, g), en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección radial. C1, C2, C3 = secciones virtuales.

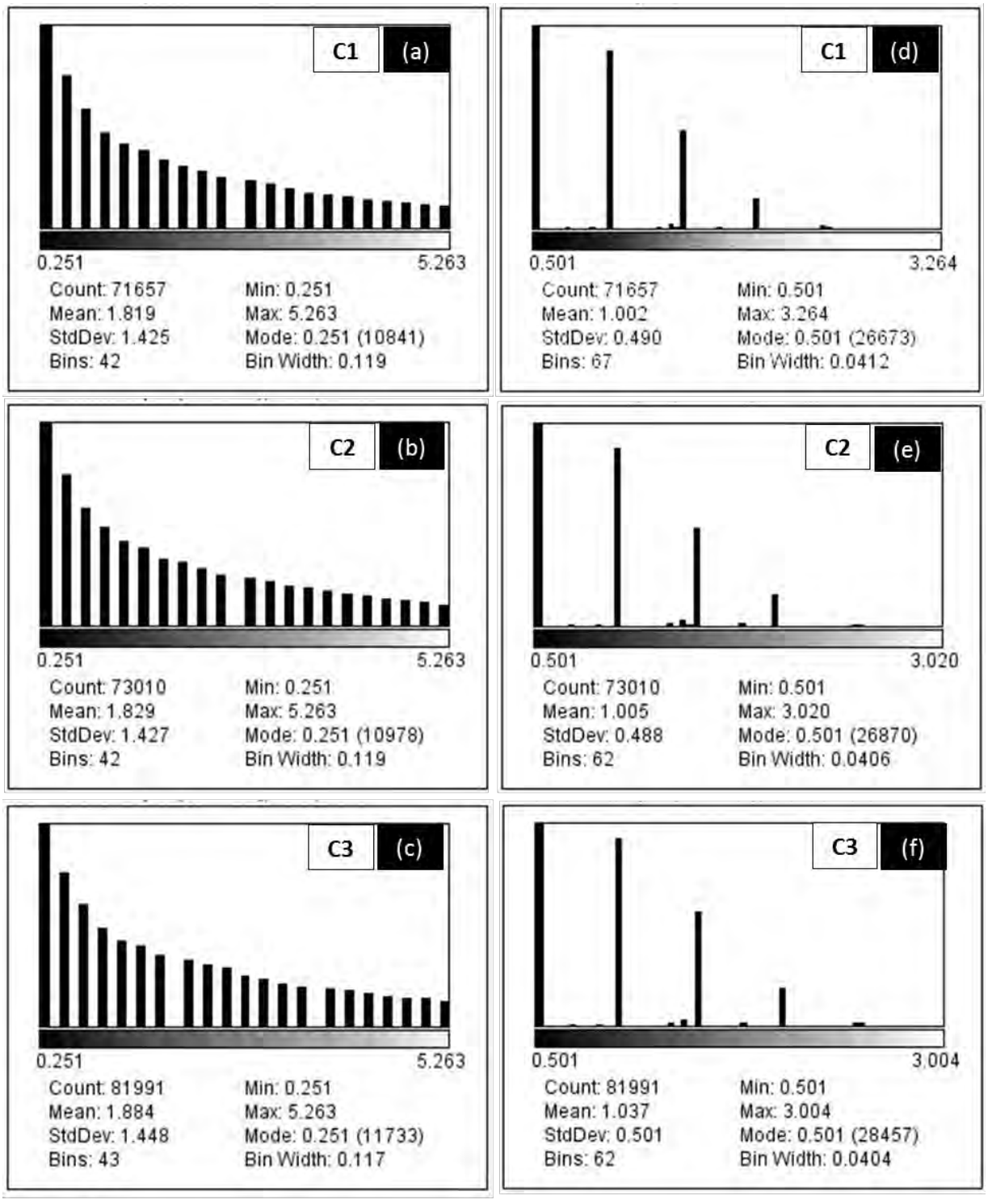


Fig. 4.23. Distribución de área en poro de puntuación de fibra (a, b, c) y de diámetro mínimo de Feret de poro en puntuación, de fibra (e, f, g), en imágenes TC rayos-X de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección tangencial. C1, C2, C3 = secciones virtuales.

Los resultados obtenidos de las distintas conectividades se presentan en el Cuadro 4.3. La mayor conectividad de la fase porosa se encontró en dirección longitudinal a la fibra con un 22.26, 9.99 y 18.60 % en los cortes C1, C2 y C3 respectivamente (Cuadro 4.3). Es en el corte virtual frente al vaso donde se presentó alrededor de 50% menos de conectividad longitudinal. Lo que pudiera contribuir a la combinación de distintas condiciones en el tejido durante el secado.

Los valores de conectividad en dirección tangencial y radial son significativamente menores, como era de esperarse, por abajo del 2% en dirección tangencial y menor al 1% en la dirección radial, esto a consecuencia de lo complejo en la conexión de porosidad en estas direcciones, en donde las puntuaciones determinan el nivel de conectividad y, a su vez, esta última condiciona la conducción de un fluido a través de los lúmenes de las fibras. Por otra parte el tejido presentó microzonas de difícil acceso a un fluido a través de la porosidad, identificadas como no interconectadas con los radios observado en la Fig. 4.11, mostrada anteriormente. Estas microzonas pudieran estar relacionadas al porcentaje de conectividad cerrada en los poros(Cuadro 4.3), sin comunicación hacia la superficie del volumen, estos resultados indican microzonas contiguas con distinta capacidad hídrica, que pudiera generar tensiones en las interfaces durante el secado y combinado con la presencia del ATPF resultar en las microgrietas observadas en esta investigación. Este confinamiento también es un obstáculo para la preservación de la madera. En el cuadro 4.3 observamos confinamientos hasta del 100% de la conectividad, esto además de los bajos valores de conectividad para el volumen analizado. La conectividad porosa longitudinal observó valores de confinamiento del 54.0 % del 18.60 % conectado (Cuadro 4.3), en la radial un 59.6 % confinado de un 0.60 conectado y para la tangencial un 92.4 % de porosidad cerrada de 1.27 % abierta.

La permeabilidad a través de la fase porosa presentó una resistencia al flujo del orden de $10^{-13}\cdot m^2$ para la dirección longitudinal a la fibra y de $10^{-15}\cdot m^2$ en dirección radial y tangencial. Los tres cortes arrojaron una permeabilidad longitudinal muy similar entre sí, al parecer manteniendo la misma relación con la fracción de volumen poroso y la tortuosidad longitudinal (Cuadro 4.3). En la dirección radial se observa una permeabilidad que corresponde de manera inversa con la tortuosidad radial y con un valor inferior en el corte 2 frente al vaso del $6.6x10^{-15}$, la permeabilidad en esta dirección fue mayor que en la dirección tangencial, probablemente por la participación de los radios (puntuaciones mayores) como lo muestran las trayectorias de flujo

en la Fig. 4.24. En la dirección tangencial se presentó mayor permeabilidad en el corte más alejado del vaso con un valor de $2.3x10^{-15}$ y nuevamente este parámetro corresponde inversamente con la tortuosidad presentada en los 3 cortes (Cuadro 4.3). Esta correspondencia es natural debido al mayor grado de dificultad en la trayectoria del fluido cuando el valor de la tortuosidad se eleva. Por otra parte, es en esta dirección tangencial donde la permeabilidad a través de los poros es menor y en donde se presentan trayectorias de flujo más complejas (Fig. 4.24).

En las Figs. 4.24, 4.25 y 4.26, se observa la influencia de la microestructura del tejido leñoso en la permeabilidad. Los desplazamientos lentos predominan ampliamente, con una velocidad en dirección tangencial de $6x10^{-7}$ a presión constante, se observa claramente la dependencia de la conectividad del tejido, la ruta del fluido tiene que bajar o subir hasta encontrar los orificios de las puntuaciones y continuar desviando su trayectoria por el interior de los radios (Figs. 4.24a y c). En la Fig. 4.24b es posible observar un patrón de flujo que corresponde a los lúmenes de radios medulares y a fibras aproximadamente alineadas, esto confirma que el desplazamiento en dirección tangencial requiere también desplazamiento radial, lo que finalmente se refleja en la información registrada por el software y arroja una velocidad y permeabilidad muy similar a la registrada en dirección radial. En la Fig. 4.24b también se observan espacios intermedios en el tejido, en donde es muy bajo el flujo. En las líneas de flujo se detectan puntos de aceleración, en color verde, por reducción en el diámetro del conducto correspondiente a las puntuaciones. Sin embargo, el flujo presenta una trayectoria por unidad de longitud mucho mayor que en la dirección radial.

En dirección radial la trayectoria de flujo también tiene que subir o bajar en el lumen de las fibras, hasta que el flujo continúa a través de los radios de manera más recta y sencilla (Fig. 4.25a). En las zonas de radios es a través de las puntuaciones intercaladas en las esquinas de la célula de parénquima, visto como flujo en zigzag (Fig. 4.25b). En la zona sin radios el flujo radial se observa nulo prácticamente (Fig. 4.25c), formando líneas de flujo solo en los radios, esto pudiera ser debido a la baja conectividad y a que las puntuaciones con mayor diámetro del parénquima requieren menor presión que las puntuaciones de fibras, lo que disminuiría la posibilidad del flujo en puntuaciones de fibra durante la simulación CFD. La velocidad máxima en esta dirección es de 10^{-6}, este pequeño incremento se presentó en el corte (2) frente al vaso, al igual que la menor conectividad del mismo.

El flujo en dirección longitudinal de las fibras se presentó de forma más sencilla, con menor trayectoria por unidad de longitud, predominando los desplazamientos relativamente rápidos, a excepción de los puntos donde existen microgrietas que comunican dos o más lúmenes de la fibra y en los extremos finales de las mismas, donde se interrumpe la conectividad (Fig. 4.24a). La velocidad máxima en esta dirección fue de 10^{-06} para los 3 cortes, este valor coincide con el de flujo radial por la aceleración dada dentro de los radios, pero la desventaja del flujo radial son las zonas sin radios y la mayor trayectoria. Sin embargo, en la Fig. 4.26a se observan las líneas de mayor velocidad, en color verde, que corresponden a fibras más largas que el corte C1, lo que origina que su lumen se comunique de extremo a extremo sin generar mayor obstáculo a la permeabilidad. Por otro lado, el flujo de manera normal corresponde a las líneas más lentas en color azul (Fig. 4.26a) que tienen líneas agregadas que conducen hacia las puntuaciones; con lo que la permeabilidad estaría disminuyendo considerablemente. Esto debido a que sin la presencia de vasos, el flujo longitudinal depende básicamente de las puntuaciones en las fibras cerradas, como se observa en las Figs. 4.26 b y c, donde las líneas azules quedan interrumpidas a mitad del tejido.

El espesor medio de pared celular del lumen a la lamela media (Cuadro 4.3) fue ligeramente mayor en el corte alejado del vaso C3 (3.04 μm).

La densidad teórica resultó similar para los 3 cortes, con un valor de 1.26 $g \cdot cm^{-3}$, lo que muestra la elevada densidad del material con la que se dispone en esta especie, en una escala donde la densidad no está condicionada por la presencia de los vasos.

Cuadro 4.2. Caracterización geométrica de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden en imágenes TC rayos-X

Medida	Virtual section C1						Virtual section C2						Virtual section C3					
	Media	Min	Max	Moda	SD	N	Media	Min	Max	Moda	SD	N	Media	Min	Max	Moda	SD	N
Sp^f (μm^2)	6.69	1.75	16.29	1.75	3.81	305451	6.81	1.75	16.29	1.95	3.90	303604	6.78	1.75	16.29	1.75	3.86	294050
$Øfp^f$ (μm)	4.15	1.80	12.83	2.91	1.54	305451	4.15	1.80	12.76	2.91	1.53	303604	4.17	1.80	13.21	2.91	1.56	294050
$Øf^mp^f$ (μm)	2.45	0.50	6.79	1.97	0.79	305451	2.48	0.50	7.00	1.97	0.80	303604	2.46	0.50	6.50	1.99	0.79	294050
$◯p^f$ (0-1)	0.80	0.14	1.00	0.99	0.19	335700	0.80	0.14	1.00	0.99	0.19	333920	0.79	0.13	1.00	0.99	0.19	327609
Sw^f (0-1)	0.82	0.32	1.00	0.85	0.09	335700	0.82	0.33	1.00	0.85	0.08	333920	0.82	0.35	1.00	0.85	0.09	327609
$Øf^mp^pr$ (μm)	1.08	0.50	3.00	0.50	0.53	82728	1.02	0.50	3.00	0.50	0.51	70727	1.05	0.50	3.00	0.50	0.52	70484
Sp^pr (μm^2)	1.76	0.25	5.26	0.25	1.39	82728	1.67	0.25	5.26	0.25	1.36	70727	1.73	0.25	5.26	0.25	1.38	70484
$Øf^mp^pt$ (μm)	1.02	0.50	3.06	0.50	0.49	71657	1.00	0.50	3.02	0.50	0.49	73010	1.04	0.50	3.00	0.50	0.50	81991
Sp^pt (μm^2)	1.81	0.25	5.26	0.25	1.42	71657	1.82	0.25	5.26	0.25	1.42	73010	1.88	0.25	5.26	0.25	1.44	81991

Nota: C1, C2, C3= cortes virtuales; Sp^f = Área de poro en fibra, $Øfp^f$ = Diámetro Feret de poro en fibra, $Øf^mp^f$ = Diámetro mínimo Feret de poro en fibra, $◯p^f$ = Circularidad de poro en fibra, Sw^f = Solidez de pared en fibra, $Øf^mp^pr$ = Diámetro mínimo de Feret en poro de puntuación radial, Sp^pr = Area en poro de puntuación radial, $Øf^mp^pt$ = Diámetro mínimo de Feret en poro de puntuación tangencial, Sp^pt = Área en poro de puntuación tangencial

Cuadro 4.3. Caracterización geométrica de madera de *Eucalyptus nitens* Maiden en imágenes TC rayos-X

Medida	ew^f (µm)	Vp^f (%)	Vs^f (%)	Vp^pt (%)	Vp^pr (%)	$\beta\iota$ (%)	βr (%)	βt (%)	$\beta_o\iota$ (%)	$\beta_o r$ (%)	$\beta_o t$ (%)	$K\iota$ (m^2)	Kr (m^2)	Kt (m^2)	$T\iota$	Tr	Tt	ρT ($g \cdot cm^{-3}$)
C1	2.84	16.02	83.97	0.83	0.76	22.26	0.67	1.27	44.3	40.7	92.4	2.2E-13	7.7E-15	1.2E-15	1.62	4.55	3.71	1.259
C2	2.95	15.66	84.33	0.53	0.68	9.99	0.60	0.63	34.7	59.6	62.5	1.9E-13	6.6E-15	1.7E-15	1.32	4.93	3.69	1.265
C3	3.04	15.80	84.20	0.64	0.62	18.60	0.48	1.17	54.0	45.4	82.2	2.2E-13	8.2E-15	2.3E-15	1.41	4.01	3.37	1.263

Nota: ew^f= Espesor de pared de fibra, Vp^f= Fracción de volumen poroso en fibra, Vs^f= Fracción de volumen solido en fibra, Vp^pr = Fracción de volumen poroso de puntuación radial, Vp^pt = Fracción de volumen poroso de puntuación tangencial, $\beta\iota$ = Conectividad porosa longitudinal, βr = Conectividad porosa radial, βt = Conectividad porosa tangencial, $\beta_o\iota$ = Fracción de conectividad longitudinal cerrada, $\beta_o r$ = Fracción de conectividad radial cerrada, $\beta_o t$ = Fracción de conectividad tangencial cerrada, $K\iota$ = Permeabilidad longitudinal, Kr = Permeabilidad radial, Kt = Permeabilidad tangencial, $T\iota$ = Tortuosidad longitudinal, Tr = Tortuosidad radial, Tt = Tortuosidad tangencial, ρT = Densidad teórica.

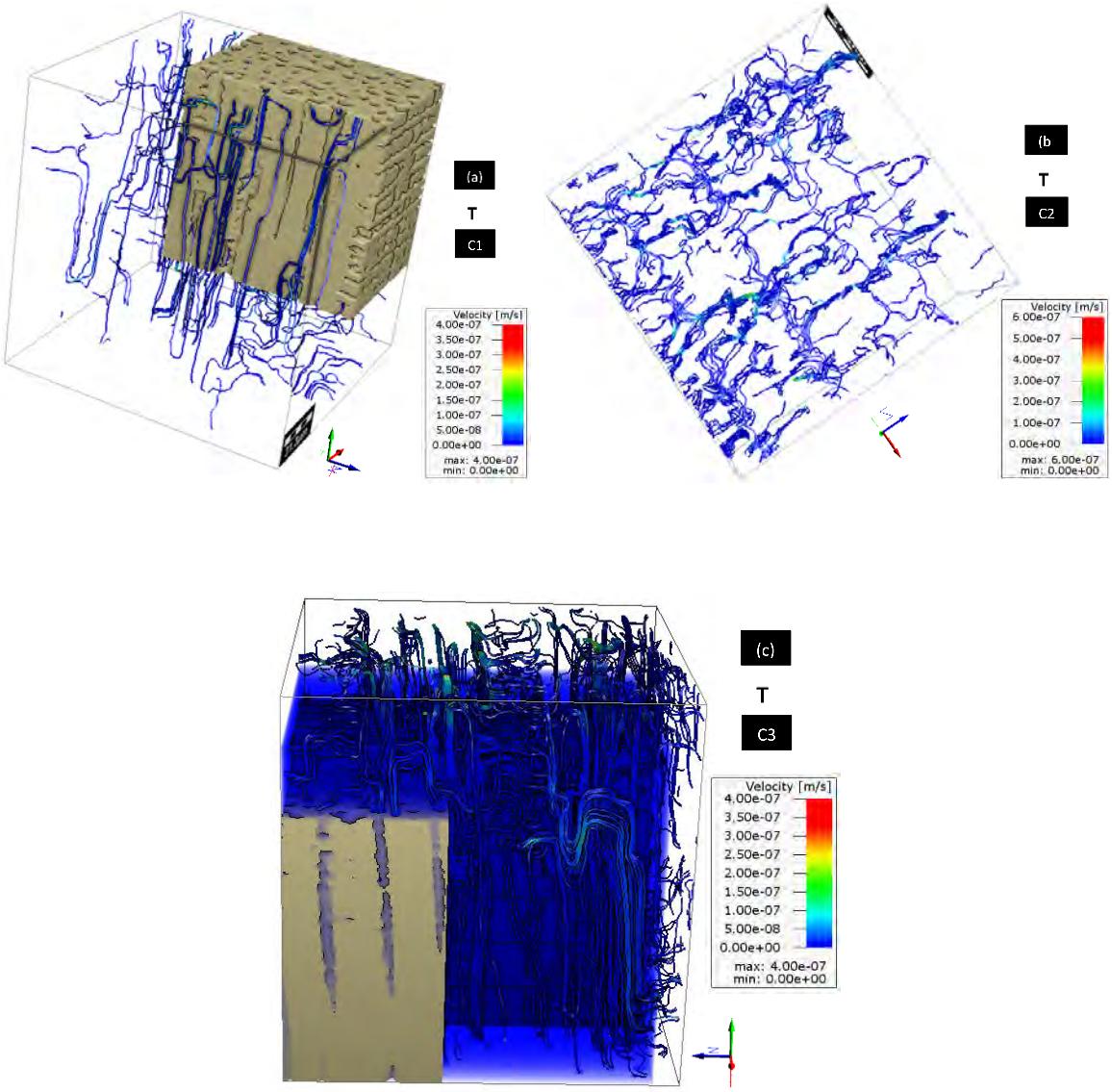


Fig. 4.24. Simulación de permeabilidad CFD de madera *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección T= dirección tangencial. a) C1= corte 1, b) C2= corte 2, c) C3= corte 3. Z = Dirección de flujo.

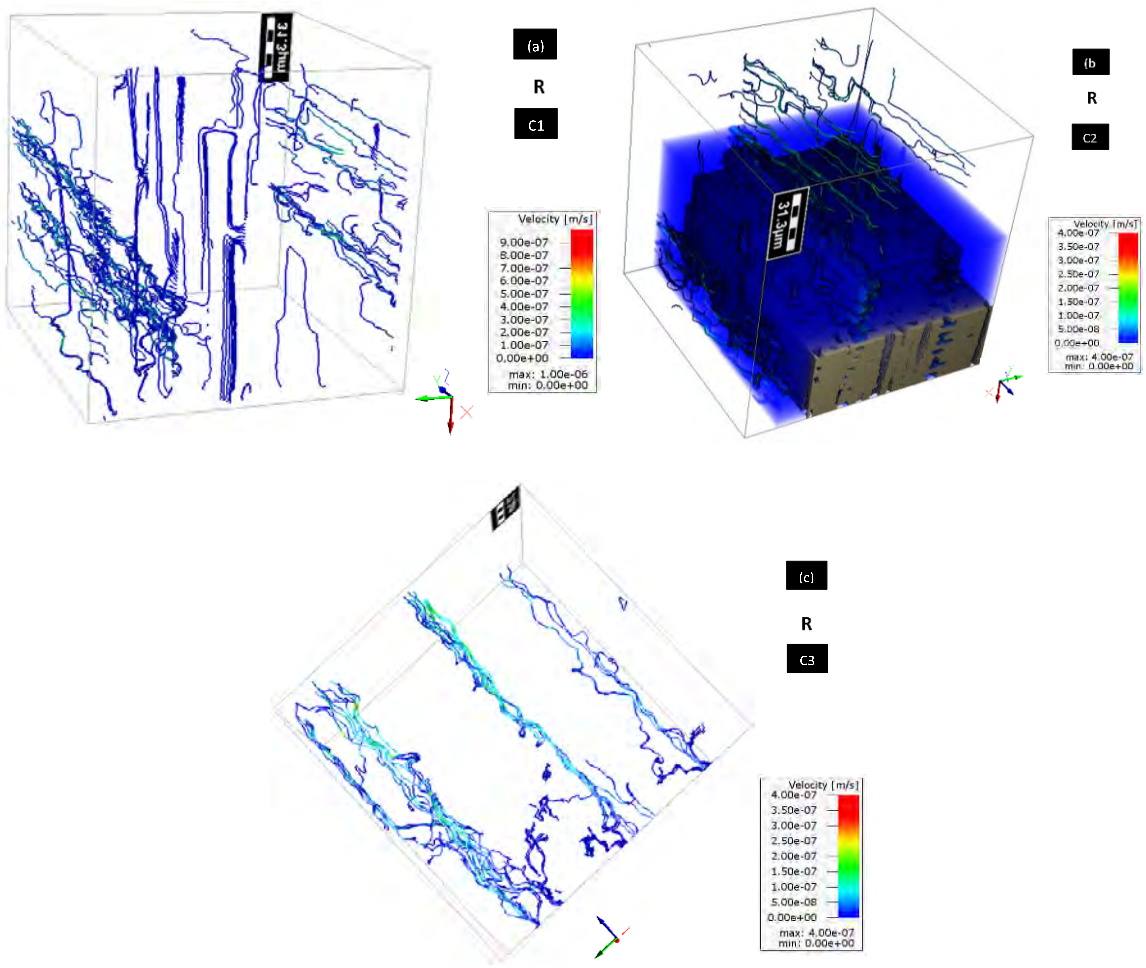
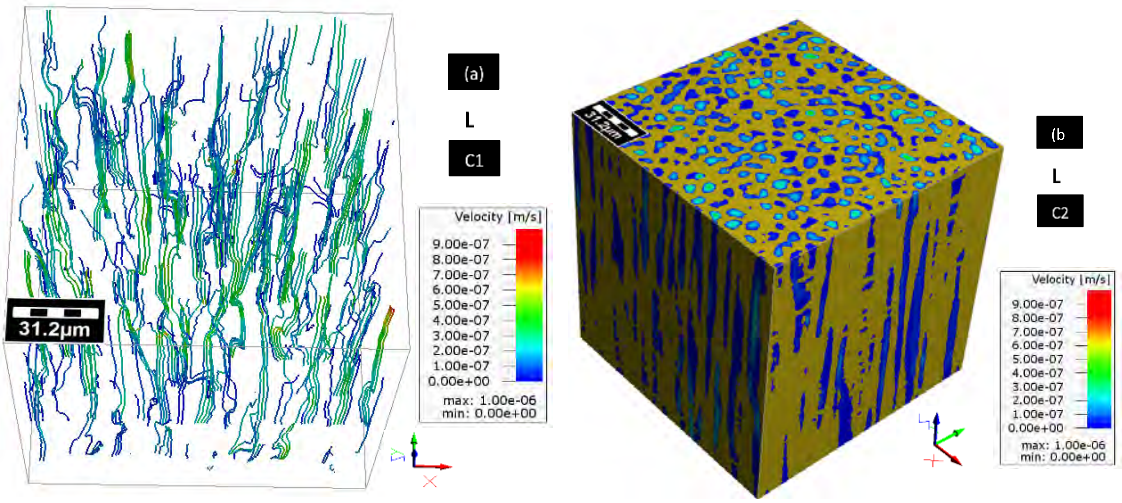


Fig. 4.25. Simulación de permeabilidad CFD de madera *Eucalyptus nitens* Maiden en dirección R= dirección radial. a) C1= corte 1, b) C2= corte 2, c) C3= corte 3. Z = Dirección de flujo.



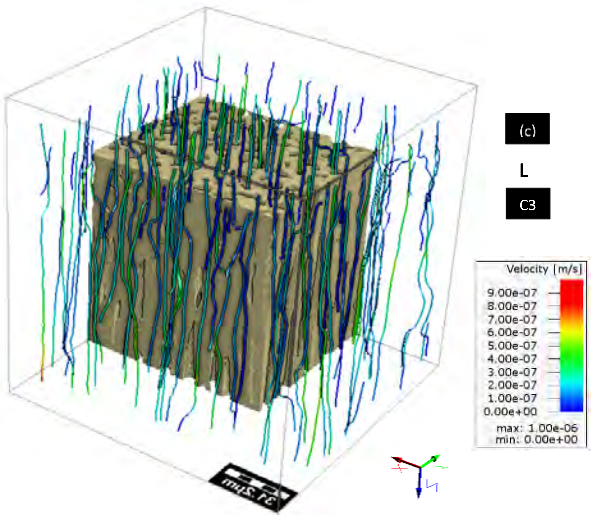


Fig. 4.26. Simulación de permeabilidad CFD de madera *Eucalyptus nitens* Maiden dirección L= dirección longitudinal. a) C1= corte 1, b) C2= corte 2, c) C3= corte 3. Z = Dirección de flujo.

4.5 Conclusiones

Los estudios realizados muestran una geometría anatómica muy similar en el tejido leñoso alrededor del vaso y una distribución espacial homogénea de parámetros respecto al vaso. Se obtuvo una media de espesor de pared mayor en C3 (ew^f = 3.04 µm). Los altos porcentajes de fracción de volumen sólido (Vs^f = 84.3%) obtenidos, dan lugar a densidades teóricas de 1.2 $g \cdot cm^{-3}$ en el tejido, este valor estará interactuando con la presencia de vasos a una escala mayor, pero reflejó directamente la capacidad disponible en la sección del tejido leñoso como material de ingeniería. La contribución de la porosidad o fracción en volumen de poros para conformar dicho material, reflejan los bajos valores obtenidos de área (Sp^f = 6.8 µm), diámetro mínimo de Feret ($Øf^{m}p^f$ = 2.4 µm) y fracción de volumen poroso (Vp^f = 15.7%). Estos mismos valores nos dan la baja proporción para retener agua libre y, en contraste, el elevado potencial para sufrir cambios dimensionales. Además, se denotó la consistencia en las mediciones con esta técnica. La baja fracción porosa de puntuaciones afectó el flujo del fluido (Vp^pr = 0.62%, Vp^pt = 0.53%). Presentó valores promedio, similares en dirección radial y tangencial, de área de poro (1.8 $µm^2$) y diámetro mínimo de Feret (1.0 µm). Su reducida fracción de volumen presentó diferencias en dirección tangencial y radial como resultado de la presencia de puntuaciones de parénquima sobre la cara tangencial.

La circularidad de poro ($\bigcirc p^f = 0.80$) y la solidez de la pared celular ($Sw^f = 0.82$) presentaron deformaciones ampliamente distribuidas en el tejido, que equivalen a cerca del 78% de poros y pared con algún grado de deformación.

Los bajos valores obtenidos de conectividad porosa longitudinal, radial y tangencial ($\beta\imath = 22.2$, $\beta r = 0.49$, $\beta t = 0.63\%$) reflejaron el grado de accesibilidad que tiene el tejido leñoso. Sin embargo, del 100% de conectividad, se obtuvieron fracciones considerables de conectividad cerrada ($\beta_o\imath = 2.9$, $\beta_o r = 98.3$, $\beta_o t = 100\%$), estos confinamientos generaron interfaces por diferencia de condición en estas microzonas.

La permeabilidad en la fase porosa del tejido mostró una tendencia similar a la conectividad e inversa a la tortuosidad del mismo.

Con la TC rayos-X fue posible la identificación del abultamiento tangencial parenquimatoso en fibra (ATPF), el cual simula hilos horizontales entre tejidos en las paredes tangenciales de las fibras. Fue posible identificar al ATPF como una sustancia que recubre la pared celular de los radios y se extiende en forma de hilos dentro de la pared de las fibras en dirección tangencial. Asimismo, se identificó el origen de microfisuras sobre la cara radial de las fibras y microgrietas en dirección tangencial.

La caracterización realizada con µTC en la madera arrojó resultados cuantitativos congruentes en comparación con los reportados en la literatura, en donde se utilizaron otras técnicas de caracterización. Además, con las imágenes adquiridas se logró un análisis que complementó el conocimiento de la madera desde un enfoque tridimensional.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el tejido presentó afectaciones estructurales debido a su anatomía y, por otra parte, demostrar la utilidad de la µTC rayos-X en el estudio de la madera.

CAPITULO 2

5 ESTUDIO DE CAMBIOS MICROESTRUCTURALES EN LA MADERA DE *Acacia mangium* MEDIANTE TOMOGRAFÍA DE RAYOS-X DEBIDO A TERMOTRATAMIENTO

5.1 Resumen

En este capítulo se estudió la anatomía de la madera de *Acacia Mangium* para determinar sus cambios después de un termotratamiento. La técnica de microtomografía de rayos-X fue utilizada para obtener imágenes 3D con un tamaño de voxel de 2.7 μm, antes y después de que la madera fuera tratada térmicamente. La microestructura fue analizada mediante la observación de las fibras, vasos y espacios intercelulares. Los resultados indican que el termotratamiento genera deformaciones en las paredes de las fibras y reducción de su lumen, aumento de la permeabilidad en vasos y del lumen de vasos, compactación de pared de fibra y degradación del Abultamiento Tangencial Parenquimatoso en Fibra (ATPF). También se determinaron algunas limitaciones para poder definir las partes más pequeñas de la madera como las puntuaciones. Se concluye que con el termotratamiento se modifica la micoestructura de la madera y que la tomografía computarizada es útil para analizar cambios en un mismo volumen de madera.

5.2 Introducción

La madera de *Acacia mangium* es de particular interés, ya que además de ser utilizada para la producción de pulpa para papel, por sus propiedades, es utilizada también en la fabricación de muebles, molduras, puertas, ventanas, elementos estructurales, fabricación de tableros o implementos agrícolas, siendo su principal limitante el uso en exteriores o en contacto directo con el suelo (Hegde *et al*. 2013), debido a su baja durabilidad natural (Razali & Mohd, 1993). Por lo que, la aplicación de un termotratamiento podría mejorar esta última propiedad.

Los procesos de termotratamiento aplicados a la madera tienen el propósito de mejorar algunas de sus propiedades como la estabilidad dimensional, la durabilidad natural, higroscopicidad y su aspecto estético (Homan & Jorissen, 2004). Otros efectos causados en la madera son la degradación térmica de su pared celular, lo que conlleva a cambios permanentes en la

microestructura y afectaciones no deseadas en propiedades como su densidad o resistencia mecánica (Boonstra *et al*. 2007). El estudio de los cambios microestructurales en forma, tamaño, orientación o cantidad de pared celular y porosidad contribuye al conocimiento del grado y tipo de afectación sufrido por la madera durante el tratamiento, además facilita la comprensión del comportamiento en los procesos de transformación y una vez puesta en servicio. Gran parte de los estudios a la microestructura se realizan empleando técnicas exploratorias 2D (Brodersen, 2013), que caracterizan los cambios en base a probetas distintas y con superficies modificadas durante su preparación, limitando el análisis tridimensional del material y la caracterización misma. El procedimiento alternativo no destructivo es el desarrollado para análisis de estructura en 3D a través de la microtomografía con rayos-X, en él se obtienen imágenes en la escala de grises con más intensidad de brillo a mayor densidad del objeto observado (Juanes, 2010). Sin embargo, la investigación en madera con esta técnica es un área poco explorada y los procedimientos, así como los alcances, no están bien definidos, lo que requiere de estudios para conocer el potencial de aplicaciones que se logran evaluar eficientemente. Por lo anterior, la presente investigación tiene como principal objetivo analizar los cambios en la microestructura mediante tomografía computarizada (TC) de rayos-X en madera de *Acacia mangium,* sufridos por un proceso de termotratamiento. Los efectos en la madera por termotratamiento han sido estudiados en diversas especies con imágenes en 2D que muestran estructuras degradadas. En madera de Thuja plicata, Awoyemi & Jones (2011) muestran la progresiva destrucción de las fibras a mayor tiempo empleado en el tratamiento y cambios anatómicos, para evaluar el deterioro recurren a la medición de propiedades fisicomecánicas de las probetas. Así mismo, en imágenes de microscopio electrónico de barrido (MEB) Zanuncio *et al.* (2013), investigaron cambios a diferentes temperaturas en madera de *Eucalyptus grandis*, encontrando un deterioro progresivo en el tejido con el aumento de temperatura y donde, para valorar su efecto, se calculan las propiedades físicas del material. En este trabajo se presenta el método para observar cambios directamente en imágenes 3D sobre un mismo volumen analizado antes y después del termotratamiento.

5.3 Materiales y métodos

5.3.1 Preparación de las muestras

La *Acacia mangium* fue colectada de una plantación forestal comercial (PFC) de 10 años de cultivo en el estado de Tabasco, México y aserrada en los laboratorios de la FITECMA. Las piezas aserradas fueron secadas en el interior del laboratorio en condiciones naturales y, a partir de este material, se seccionaron las piezas para la tomografía acorde al tamaño de voxel empleado y en base a la parte de la microestructura a observar; en el cuadro 5.1 se especifican estos datos. El seccionamiento de las muestras se realizó con una navaja de acero manual. Finalmente se seleccionó una probeta sin defectos superficiales aparentes (Fig. 5.1).

Fig. 5.1. Probetas de *Acacia mangium* Willd. a) Probeta de 2x2x8 mm, b) Probeta de 8x2x20 mm.

Cuadro 5.1 Dimensión de probetas de madera y objeto de estudio para imágenes TC rayos-X

Especie	Probeta a x g x l (mm)	Tamaño de voxel (μm)	Elemento microestructural	Objeto de estudio
Acacia mangium	2 x 2 x 8	2.7	Fibras y vasos	Cambios por termotratamiento

5.3.2 Métodos

Las probetas fueron secadas por deshidratación en horno digital a 103±2°C hasta peso constante (estabilizadas a estado anhidro), y aisladas, para su traslado, con película estirable de cloruro de polivinilo. Se rectificó el estado anhidro antes de cada escaneo tomográfico.

Se realizó una tomografía inicial a la probeta de *Acacia mangium* de sección 2x2 mm en estado anhidro.

Después de la primera tomografía, a la probeta se le aplicó un termotratamiento de 200°C durante 2.5 horas tiempo efectivo, en atmosfera no inerte y sin presencia de humedad. Enseguida se realizó una segunda adquisición de imagen 3D mediante tomografía de rayos-X a la probeta.

5.3.2.1 Adquisición de datos

El equipo de tomografía Xradia Zeiss Versa 510 propiedad del Laboratorio Universitario de Microtomografía de Rayos X (LUMIR), Centro de Geo ciencias UNAM, fue utilizado para obtener las imágenes bajo las siguientes especificaciones: Tensión de 75 kV, 7W, desplazamiento angular de 0.181°, tiempo de exposición de 10 s/radiografía, 1982 radiografías, tamaño de voxel de 2.7 μm, hoja de cobre como filtro, secuencia de reconstrucción en el software del sistema de TC, porte de la matriz de la cámara 1024 x 1024 pixeles. El tamaño de la imagen empleada fue de 992 x 994 x 1014 pixeles, lo que representa un volumen de 2.678 x 2.683 x 2.737 mm. La adquisición de imágenes fue en formato no comprimido en archivo de imagen etiquetada (TIFF) y los softwares empleados fueron los programas libres de código abierto ImageJ y Fiji. Las simulaciones se realizaron con el software GeoDict® (Math2Market GmbH, www.geodict.com). Para calcular la tortuosidad se utilizó el software AVISO®.

5.3.2.2 Tratamiento de imágenes

Para el análisis se extrajeron secciones centrales de las imágenes iniciales (Fig.5.2), realizando cortes virtuales aleatoriamente. Para la comparación entre el antes y el después de un corte, se realizó el corte virtual en la región de interés de coincidencia, haciendo uso de la herramienta para rotar coordenadas y para seccionar la imagen en ImageJ.

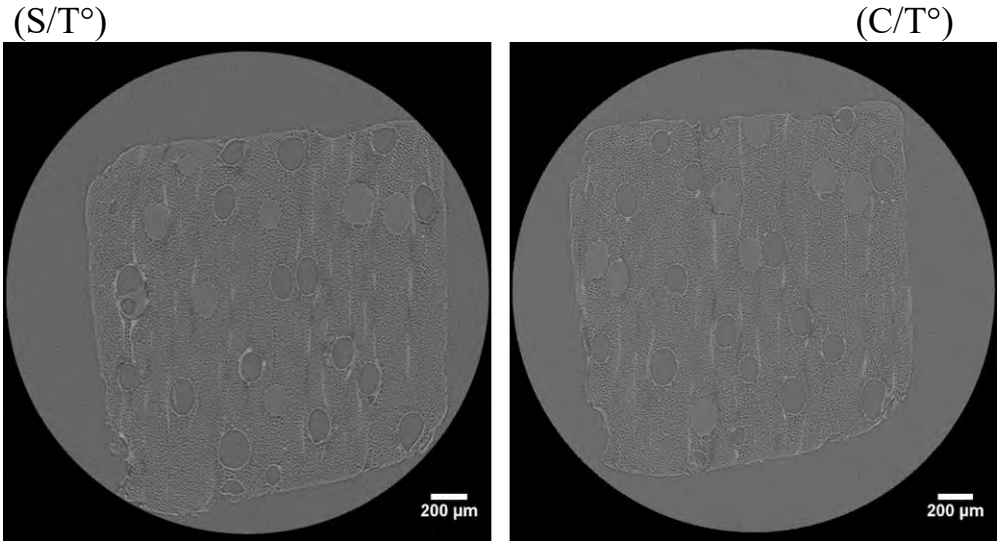


Fig. 5.2. Imagen inicial de *Acacia mangium* de 992 x 994 x 1014 pixeles. S/T) Sin termotratamiento, C/T) Con termotratamiento.

Después de aplicarles el filtro de media 3D e intensificar el contraste, se procedió a binarizar las imágenes. Para la binarización se utilizó el método Sauvola (Sauvola & Pietikäinen, 2000) con el cual se segmentó virtualmente a los vasos del resto del tejido. Con este método también se segmentaron los vasos infiltrados por pegamento adquirido durante el ensayo de tomografía (Fig. 5.3). Posteriormente se procedió a medir las características geométricas.

Las mediciones de los niveles de brillo en los pixeles de las imágenes se realizaron en 2D, con los trazos de perfil para cada una de las rutas marcadas. Se dividieron 2 principales rutas: las trazadas sobre la pared tangencial de las fibras, y sobre la pared radial de las fibras. La medición en 3D se realizó en un volumen a través de la dirección longitudinal a las fibras, la cual fue tomada como dirección z.

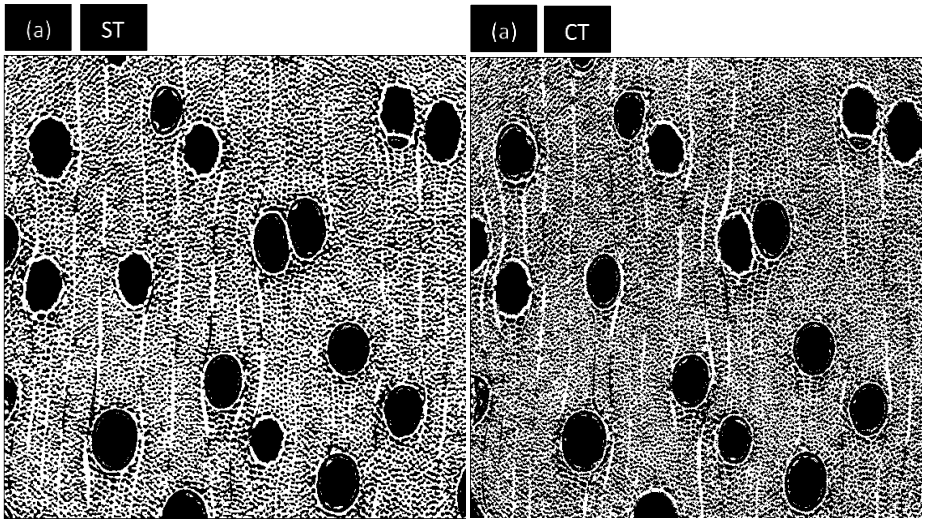


Fig. 5.3. Imagen binaria de madera de *Acacia mangium.* a) De 1539 x 1539 µm sin tratamiento (ST), b) De 1596 x 1596 µm con termotratamiento (CT).

5.3.2.3 Caracterización geométrica

La fracción de volumen de cada fase se calculó utilizando la técnica de conteo de voxeles que pertenecen a una fase y dividiéndolo por el número total de voxeles contenidos en la imagen; la suma de todas las fases representa el total del volumen analizado. El espesor de pared se evaluó realizando aberturas 3D sobre los voxeles de la imagen, que consisten en aberturas morfológicas secuenciales 3D (erosión de voxeles seguida de dilatación indiscriminada) con aumento progresivo del tamaño del elemento estructurador (en este caso fue utilizado un octaedro).

El área de los poros en vasos y fibras se calculó por separado en el total de los cortes que conforman las imágenes 3D, cuantificando los voxeles que la cubren. Las deformaciones del lumen se calcularon con la circularidad (C) de los poros, la cual está dada por (ec.5.1) la relación entre el perímetro (P) y el área (A), con valor 1 para círculos y valores tendientes a 0 para figuras alargadas. La deformación de la pared celular se calculó con (Ec.5.2) la solidez (S) de los poros que relaciona el área (A) de este con el área convexa (Ac) que lo circunscribe. La alta concavidad (ondulaciones) en el perímetro del poro está representada por una menor área que la circundante de este y, como resultado, una solidez que tiende a 0. De esta manera, una deformación nula en la pared celular tendrá una solidez máxima de 1. La medición de diámetros de poros se realizó

midiendo el diámetro mínimo de Feret que considera la distancia minima perpendicular entre 2 tangentes al poro. Para calcular la densidad teórica (ρT) del volumen analizado, se utilizó la densidad real (ρr) del tejido leñoso de 1.5 $g \cdot cm^{-3}$ y la fracción de volumen sólido en % (Vs) en relación con la porosidad presente (Ec.5.3), en este caso se consideró el total de la porosidad en la madera.

$$C = 4\pi\ A / P^2 \qquad \text{(Ec. 5.1)}$$

$$S = A/Ac \qquad \text{(Ec. 5.2)}$$

$$\rho T = (Vs\ \rho r)/100 \qquad \text{(EC. 5.3)}$$

5.3.2.4 Simulaciones de flujo

Las imágenes binarias, se exportaron al software GeoDict® (Math2Market GmbH, www.geodict.com) para la simulación de flujo computacional CFD (Computational Fluid Dinamics) de permeabilidad. El método utilizado fue el de las ecuaciones fundamentales de Navier-Stokes que describen el comportamiento del fluido, resueltas numéricamente por CFD. Para calcular la permeabilidad se utilizó el módulo FlowDict del software GeoDict®, el cual emplea la ley de Darcy para velocidades lineales. Esta ley es expresada como (Ec.5.4):

$$K = Q\mu/A\ \ 1/(dP\ /\ dL) \qquad \text{(Ec. 5.4)}$$

Donde K es la permeabilidad del medio en m^2 o en μm^2, Q es el caudal volumétrico del fluido en $m^3 \cdot s^{-1}$, μ es la viscosidad dinámica del fluido en kg $(s \cdot m)^{-1}$, A es el área del medio y $dP \cdot dL^{-1}$ es el gradiente de presión entre la entrada y salida del medio en $Pa \cdot m^{-1}$. Para la simulación se utilizó una temperatura de 20 °C, como fluido estándar el agua con una densidad de 998.234 $kg \cdot m^{-3}$ y una viscosidad de 0.001 $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$.

La tortuosidad geométrica en los vasos, entendida como el grado de dificultad en la trayectoria de un fluido, fue estimada por el software AVISO®. La forma de calcular esta propiedad es a

través de la ecuación 5.5, en donde τ es el cociente de tortuosidad, |v| es el valor absoluto de la velocidad de flujo local, v_x es la componente x de la velocidad promedio en la dirección de flujo y ⟨ ⟩ denota el promedio espacial a través del poro.

$$\tau = \langle |v| \rangle / (\langle v x \rangle) \qquad \text{(Ec. 5.5)}$$

5.4 RESULTADOS Y DISCUCIÓN

5.4.1 Identificación cualitativa anatómica

Las imágenes obtenidas de las tablas de búsqueda LUT (LookUpTables) de colores predefinidos que separan diferencias en el nivel de brillo en cada pixel, muestran la microestructura de la madera de *Acacia mangium* (Fig. 5.4), identificando las fibras, los radios uniseriados y biseriados, las células de parénquima paratraqueal, los vasos, los vasos infiltrados por sustancias que no forman la parte estructural. Así como incrustaciones minerales y el lumen celular. Destacan los sitios de mayor luminiscencia como terminaciones de las fibras, pared celular e incrustaciones. La resolución obtenida con un voxel de 2.7 μm^3, alcanzó una reconstrucción tridimensional del tejido que difícilmente define las puntuaciones del mismo.

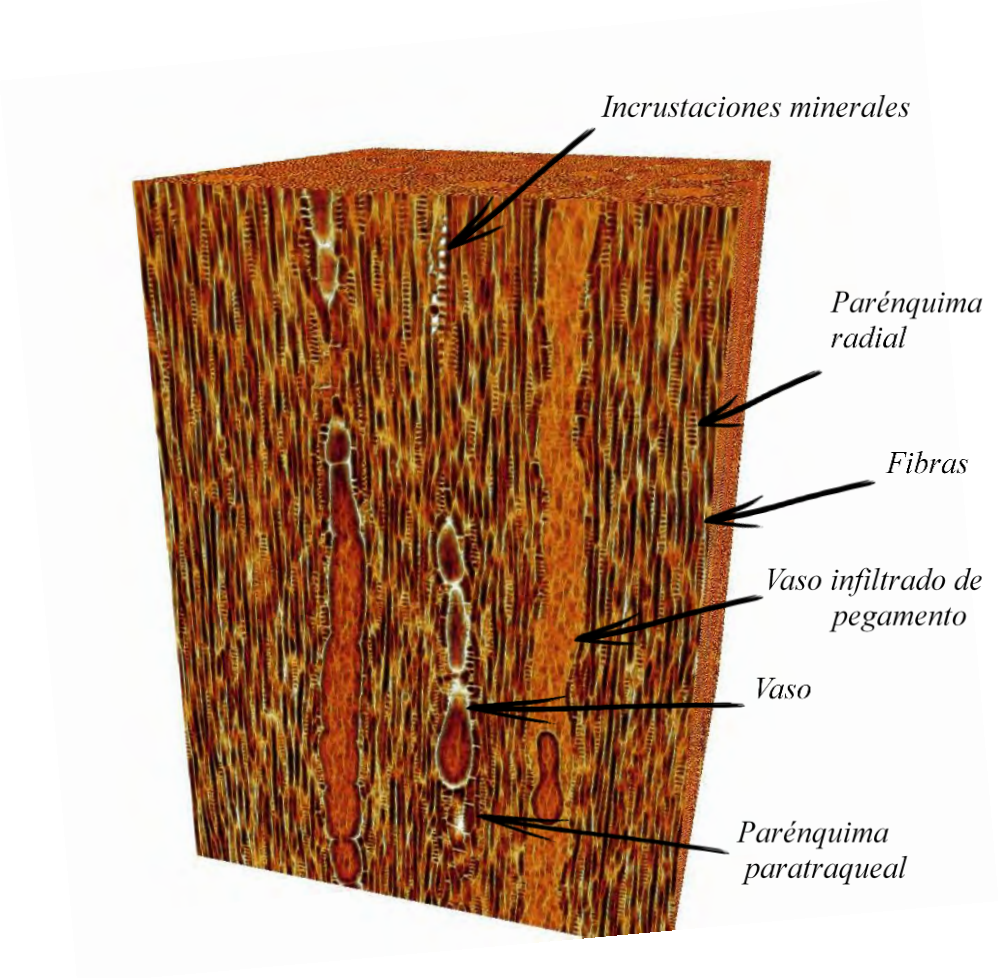


Fig. 5.4. Imágen de TC rayos-X reconstrucción 3D con tabla LUT de madera *Acacia mangium* Willd.

Un efecto del termotratamiento observado en el tejido y recurrente en el volumen analizado, son los ligeros desplazamientos transversales que se presentan a diferentes alturas a lo largo de las fibras, como resultado de contracción transversal. Un ejemplo de estos desplazamientos se muestra en el corte virtual de la Fig. 5.5. La fracción de las fibras dentro del circulo (Fig. 5.5a) aparece desplazada en dirección tangencial, después del termotratamiento de la madera (Fig. 5.5b). El resto del tejido en la imagen se observa sin desplazamiento con las mismas coordenadas que en la madera sin termotratamiento. De acuerdo al volumen analizado estos ligeros movimientos no mostraron microfisuras asociadas, probablemente por no haber excedido el dominio elástico de las fibras.

Por su parte la pared de vaso y de parénquima axial se distinguen con un nivel de gris superior al resto del tejido en la Fig. 5.6a, correspondiente a la madera sin termotratamiento (ST), y se puede apreciar que ha habido una degradación superficial en dicho tejido en la región señalada con las flechas (Fig. 5.6b), donde disminuyó la intensidad de brillo en la escala de grises del mismo y mostrando con esto una ligera pérdida de volumen en estas regiones correspondientes a la madera con termotratamiento (CT), lo que modificó también el espacio vacío observado en la madera y probablemente podría repercutir en sus propiedades fisicomecánicas.

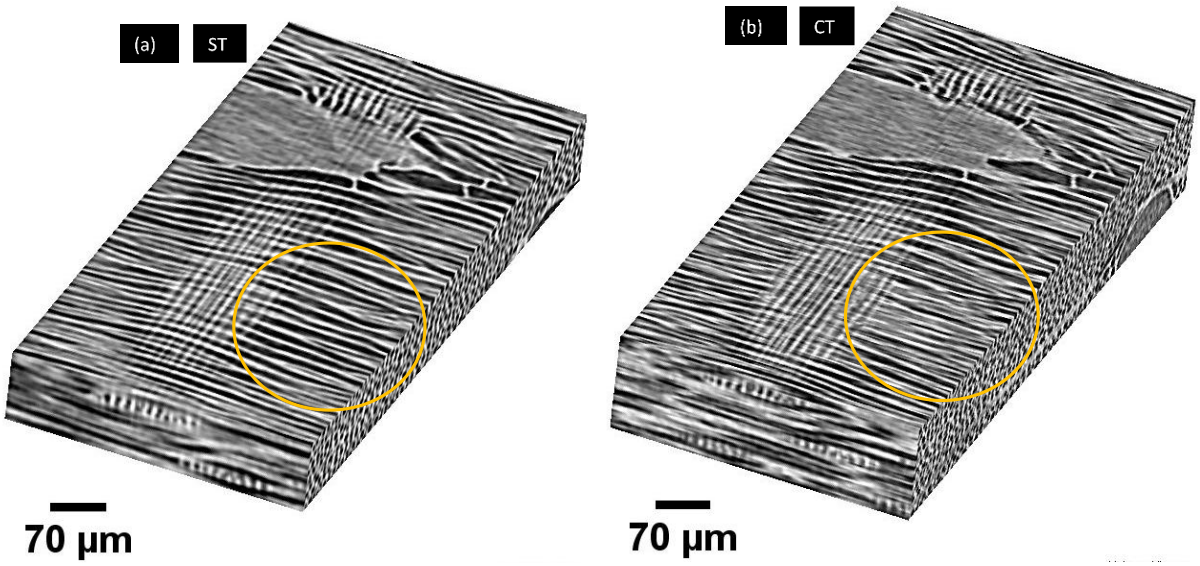


Fig. 5.5. Imagen de TC-rayos X de fibras con desplazamiento tangencial en madera de *Acacia mangium* Willd. ST= sin termotratamiento, CT= con termotratamiento.

Este tipo de degradación detectada en el volumen analizado se puede observar también como un cambio en el lumen de los vasos, en la Fig.5.6c se muestra la microestructura sin tratamiento y con la pared de los vasos completa, en contraste la Fig. 5.6d, correspondiente a madera termotratada, es señalado el detalle donde ya no aparece la pared intermedia (platina) entre los 2 vasos, como producto del deterioro en este sitio. La eliminación de obstáculos dentro del lumen de los vasos es una condición que puede mejorar la capacidad de flujo en la madera termotratada.

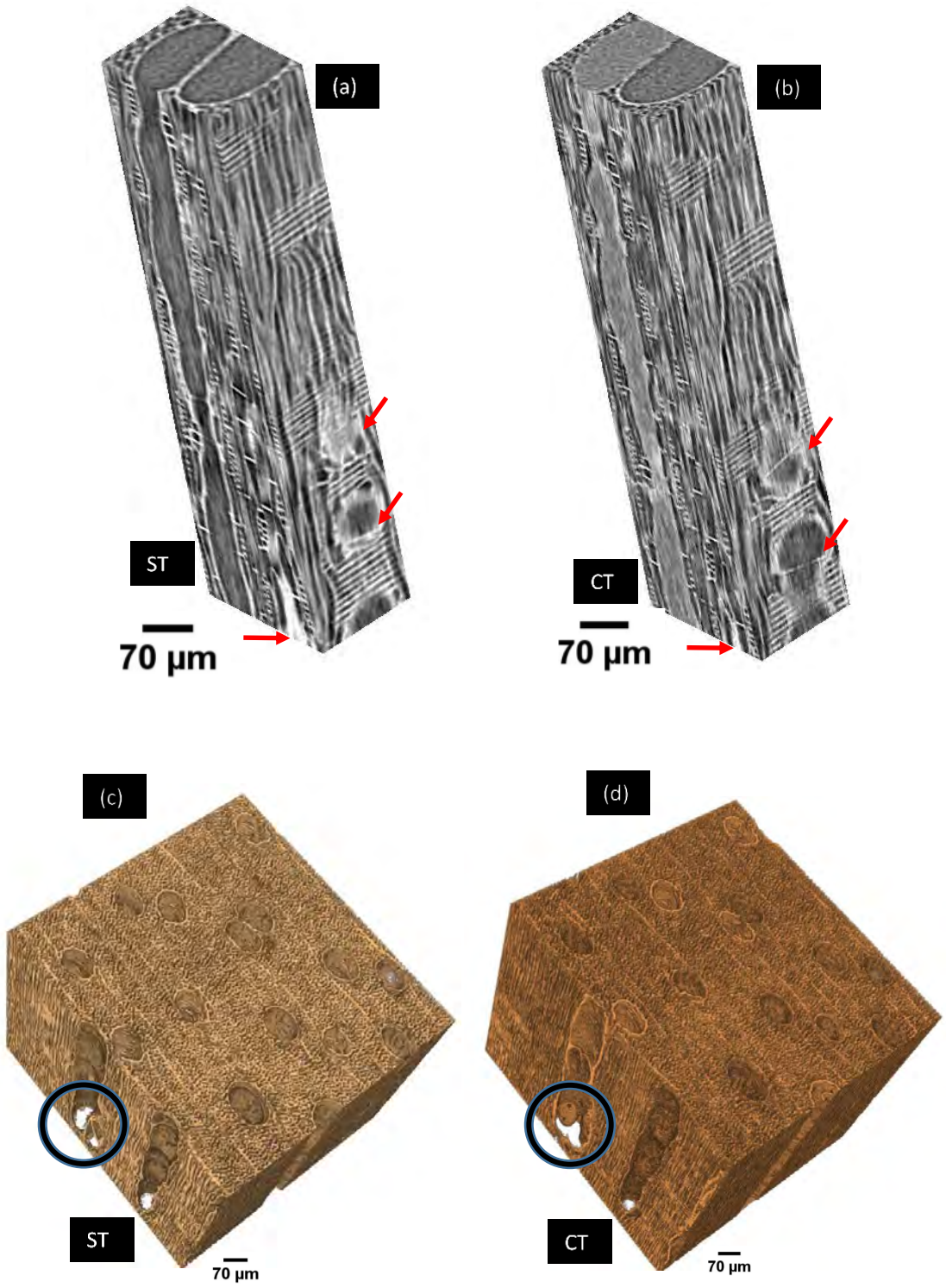


Fig. 5.6. Degradación de pared en imágenes de TC rayos-X en secciones virtuales de madera *Acacia mangium* Willd. a) Microestructura sin tratamiento en escala de grises, b) Microestructura con termotratamiento en escala de grises, c) Imagen binaria del tejido sin tratamiento, d) Imagen binaria del tejido con termotratamiento. ST= sin termotratamiento, CT= con termotratamiento.

En los acercamientos a las fibras fue posible observar algunas puntuaciones en la pared, con incremento de su cavidad después del termotratamiento. En las Figs. 5.7a y 5.7b se muestra un ejemplo de la comparación entre el mismo corte virtual ST y CT, donde se observa a dicha cavidad más abierta (señalada con flechas en blanco). Se ha reportado por Awoyemi & Jones (2011); Boonstra *et al.* 2006; Zanuncio *et al*., 2013; Batista *et al.* (2015) que las temperaturas aplicadas en termotratamiento que oscilan los 200°C generan desprendimientos de pared celular, este es un efecto que podría coincidir con la apertura en la cavidad de las puntuaciones.

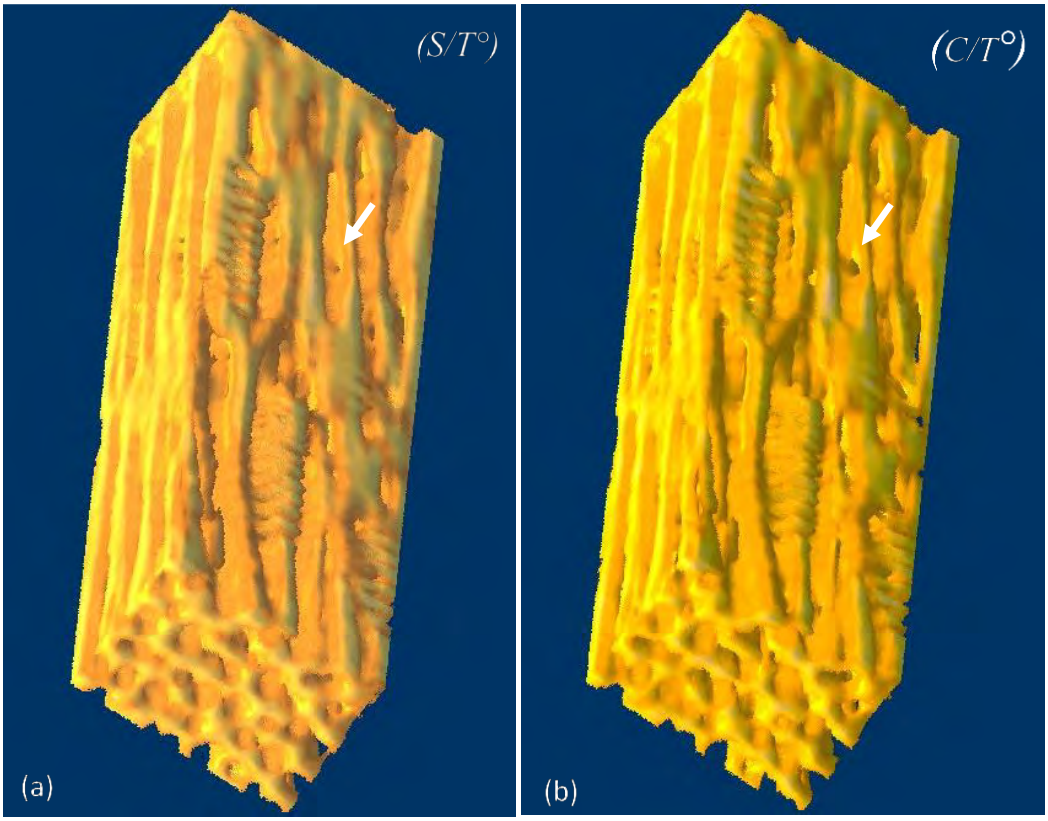


Fig. 5.7. Reconstrucción 3D de fibras de madera *Acacia mangium* Willd. a) Corte virtual del tejido sin termotratamiento, b) Corte virtual del tejido con termotratamiento. ST= sin termotratamiento, CT= con termotratamiento.

El tamaño de voxel empleado en la presente investigación no definió con suficiente claridad a las puntuaciones. Sin embargo, en los acercamientos a estos sitios fue posible observar a los

sectores conformados por la distinta intensidad de brillo. En dichos acercamientos los sectores de menor luminiscencia corresponden a la cavidad de la puntuación. En la Fig. 5.8 se muestra una comparación entre el antes (ST) y el después (CT) de la cavidad en las puntuaciones en una fibra. Los sectores señalados con flechas en rojo corresponden a las cavidades antes y después (Figs. 5.8a y 5.8b), las líneas blancas señalan las longitudes de los laterales del sector, en cuyo caso se observa el incremento de estas líneas blancas o sectores en la imagen (Fig. 5.8b) de la madera termotratada. En contraposición, también se observa en estas imágenes la compactación de la pared de la fibra, ya que las dimensiones de sus sectores se redujeron.

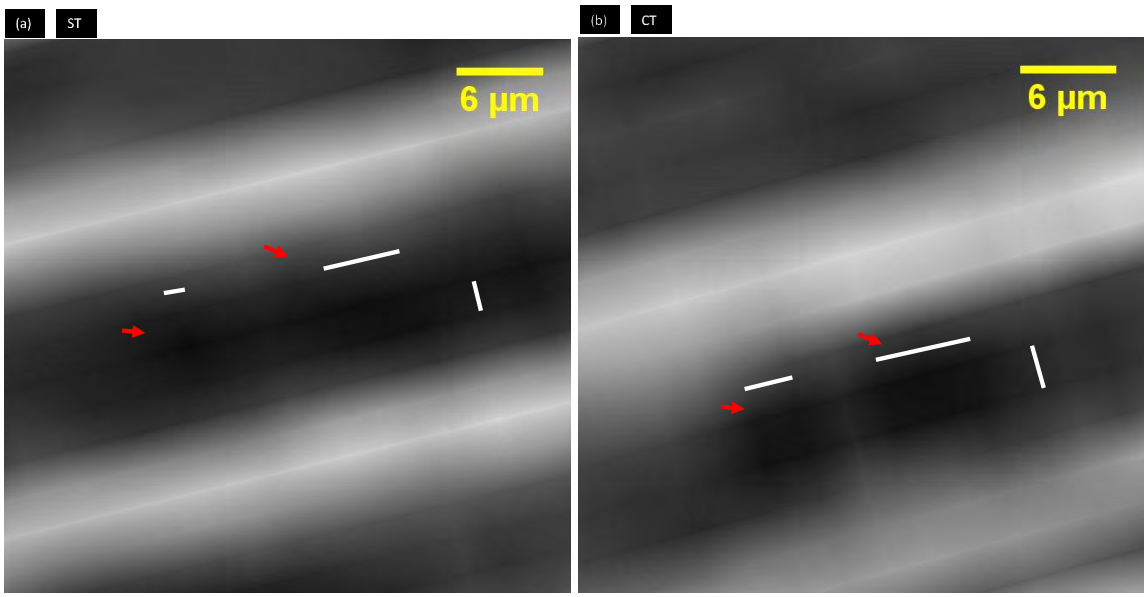


Figura 5.8. Acercamiento en imágenes de TC rayos-X de secciones virtuales de madera *Acacia mangium* Willd. a) Puntuaciones en fibra de madera sin termotratamiento, b) Puntuaciones en fibra de madera con termotratamiento. ST= sin termotratamiento, CT= con termotratamiento.

La reducción del sector en la pared de fibra en dirección transversal se puede constatar con la referencia en la escala, pero además con el acercamiento entre las flechas en rojo y las líneas en blanco, como punto de referencia entre la imagen de ST y CT.

Las incrustaciones de minerales presentes en las imágenes obtenidas, no mostraron ningún cambio singular antes y después del termotratamiento, escasamente el desplazamiento de alguna

de las formaciones minerales, como lo señalan las flechas en rojo entre la Fig. 5.9a de madera sin tratamiento y la Fig. 5.9b de madera termotratada.

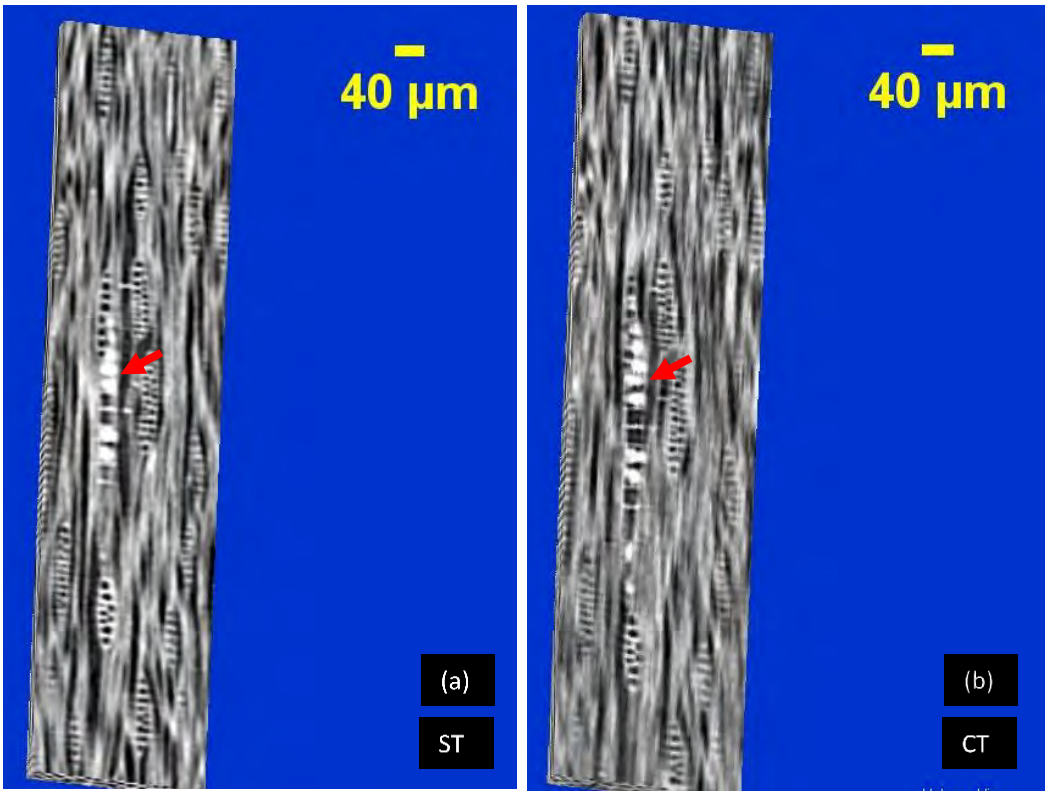


Fig. 5.9. Imagen TC de incrustaciones de prismáticos en madera *Acacia mangium* Willd. a) Incrustación en el tejido sin tratamiento, b) incrustación en el tejido con termotratamiento. ST= sin termotratamiento, CT= con termotratamiento.

Los resultados obtenidos de las distintas fases porosas indican haber experimentado cambios por el termotratamiento. El lumen de los vasos presentó un desplazamiento transversal como resultado de los desplazamientos en el tejido (fibras). En las Figs. 5.10a y 5.10b los vasos en azul corresponden a madera antes del tratamiento y los cafés a madera después del termotratamiento, se observa cómo es mayor el desplazamiento en las zonas donde los vasos se encuentran aislados, es decir, en donde existe mayor cantidad de fibras. No se observan deformaciones significativas en los vasos CT respecto de ST en las Figs. 5.10a y 5.10b.

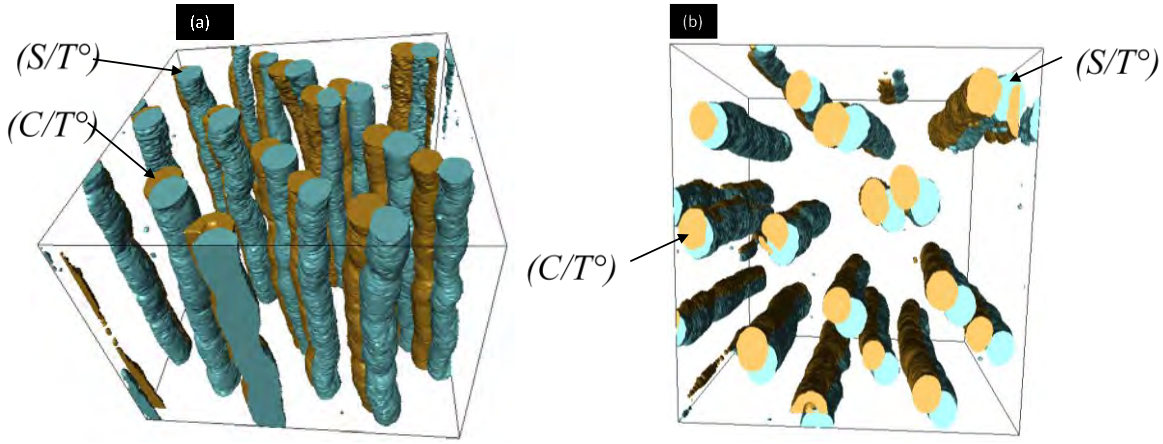


Fig. 5.10. Imágenes TC de lumen en vasos de madera *Acacia mangium* Willd. a) Vista frontal, b) Vista superior. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

En las Figs. 5.11a y 5.11b se muestra el efecto entre el antes y el después del termotratamiento sobre el lumen de las fibras. Los 2 cambios observados son el acercamiento entre lúmenes y deformaciones ocasionales en el mismo, estos cambios son el resultado directo de los desplazamientos o deformaciones en el tejido ya mencionados. La mayor porosidad por unidad de área, generalmente es un factor que disminuye la resistencia del material. En la madera termotratada se reportan estas disminuciones en resistencia mecánica como características de este material (Calonego *et al.*, 2011; Korkut, & Budakçı, 2009; Moliński *et al.*, 2016). En la presente investigación, este acercamiento entre los lúmenes de las fibras en madera termotratada puede contribuir a la pérdida de resistencia reportada en otros trabajos de investigación.

Fig. 5.11. Imágenes TC de lumen en fibra de madera *Acacia mangium*; a) ST= Sin termotratamiento, b) CT= Con termotratamiento.

En la fase porosa de los radios medulares, la dificultad de observación cualitativa a detalle es mayor debido al tamaño de voxel empleado. Sin embargo, un aspecto visible es que las filas de las células de parénquima (Fig. 5.12a) presentan una ligera reducción en sus lúmenes (Fig. 5.12b), probablemente como resultado de un aplastamiento en su pared celular por termotratamiento.

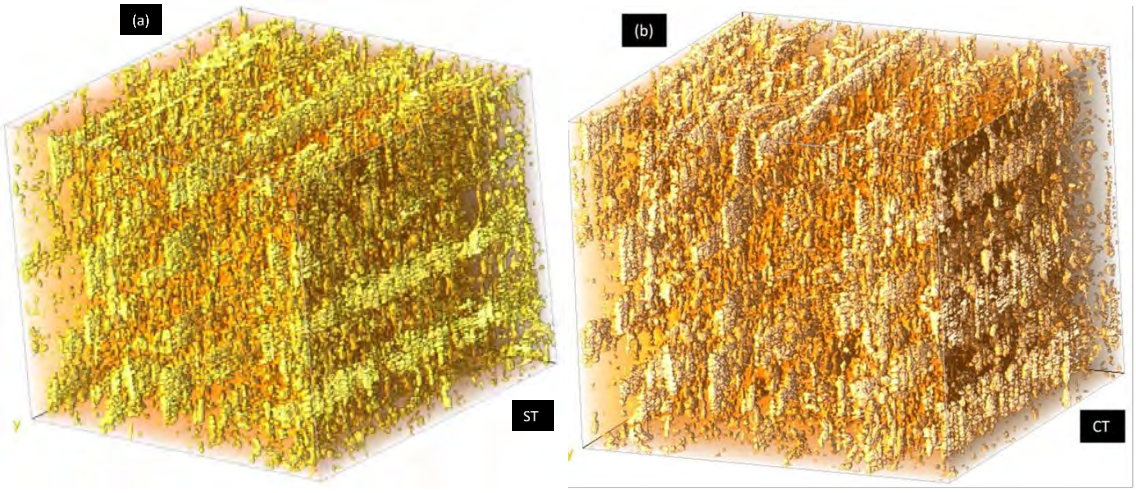


Figura 5.12. Imágenes TC de lumen en rayos de madera *Acacia mangium* Willd. a) ST= Sin termotratamiento, b) CT= Con termotratamiento.

5.4.2 Caracterización geométrica-microestructural

Los cambios cuantitativos en la microestructura de madera de *Acacia mangium* por termotratamiento, fue posible evaluarlos a partir de las imágenes reconstruidas tridimensionalmente de microtomografía computarizada rayos-X. Estas imágenes además de contener las formas y tamaños en la microestructura, también cuentan con información sobre el nivel de brillo en cada voxel. Los niveles de brillo son estimativos de la densidad del material en el voxel. Los resultados obtenidos en la medición del nivel de brillo a través de las imágenes antes y después del termotratamiento (Fig. 5.13a, 5.13b) en su original escala de gris, se muestran en los histogramas (Figs. 5.14a, 5.14b) de la media de nivel de brillo en cada corte 2D a través del eje *z* (dirección longitudinal a la fibra) de la imagen 3D.

El nivel de brillo de ST (Fig. 5.14a) muestra una clara tendencia a disminuir a medida que se avanza longitudinalmente en la madera, muy probablemente como resultado de la disminución de densidad de igual manera en la madera analizada. Para la madera después del tratamiento, esta tendencia se invirtió (Fig. 5.14b), presentando tendencia al aumento en donde antes disminuía. Este comportamiento puede ser un indicio de que el termotratamiento generó más cambios en el tejido con menor densidad. De acuerdo a los resultados en las imágenes (Figs. 5.14a, 5.14b) la media del nivel de brillo aumentó, después del termotratamiento, un 0.85 % (Cuadro 5.2). Este incremento refleja una compactación de la pared celular en la madera termotratada en la misma medida.

En la Fig. 5.15 se muestran los resultados de la media del nivel de brillo longitudinal medido en 2 cortes virtuales, en los que se seleccionó únicamente la región de interés con fibras y parénquima, sin la presencia de vasos. Los resultados (Figs. 5.15 a, b, c, d) en los 2 cortes indican valores muy similares entre sí y un comportamiento similar al del corte anterior donde sí se seleccionó la pared de los vasos. Para el caso del primer corte (Figs. 5.15 a, b) el nivel de brillo aumentó con el termotratamiento un 0.66 % y para el segundo (Figs. 5.15 c, d) un 1.19 % (Cuadro 5.2).

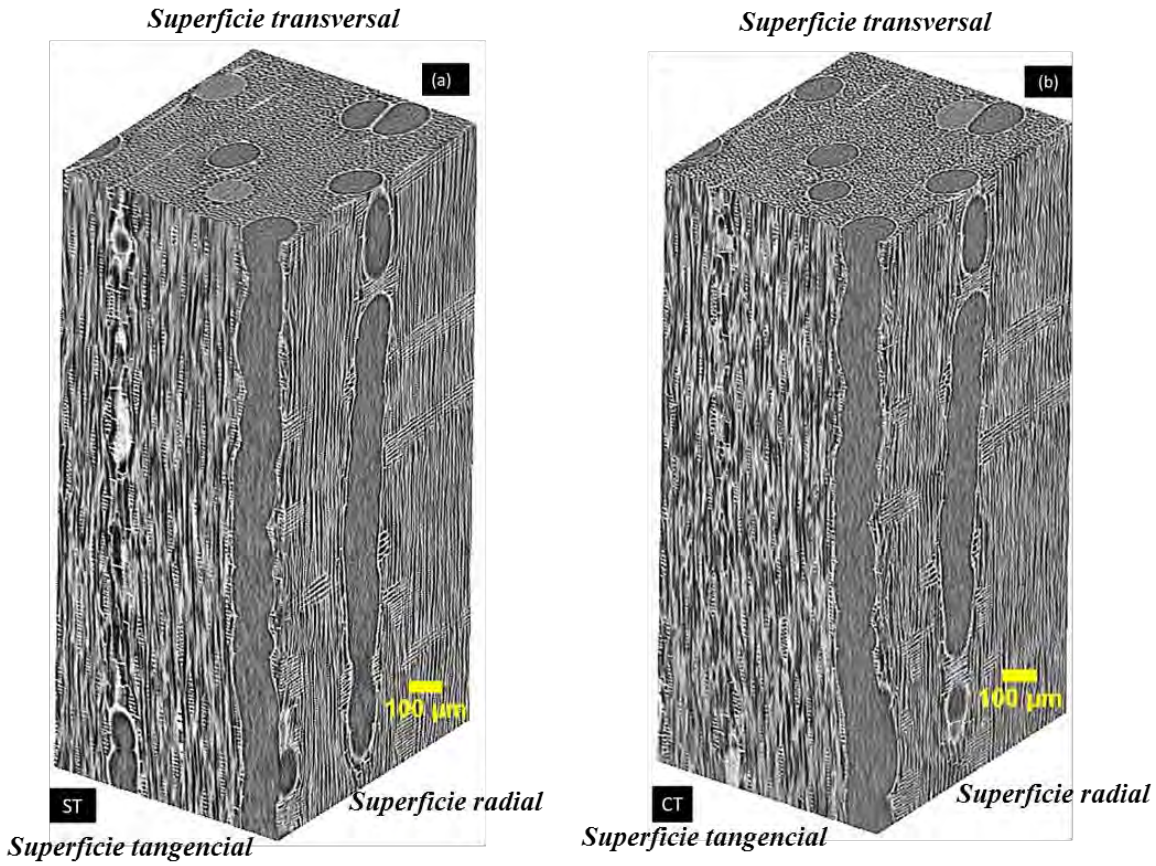


Fig. 5.13. Imagen de TC rayos-X de secciones virtuales de madera *Acacia mangium* Willd. a) Tejido sin tratamiento en escala de gris original, b) Tejido con termotratamiento en escalad de gris original. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

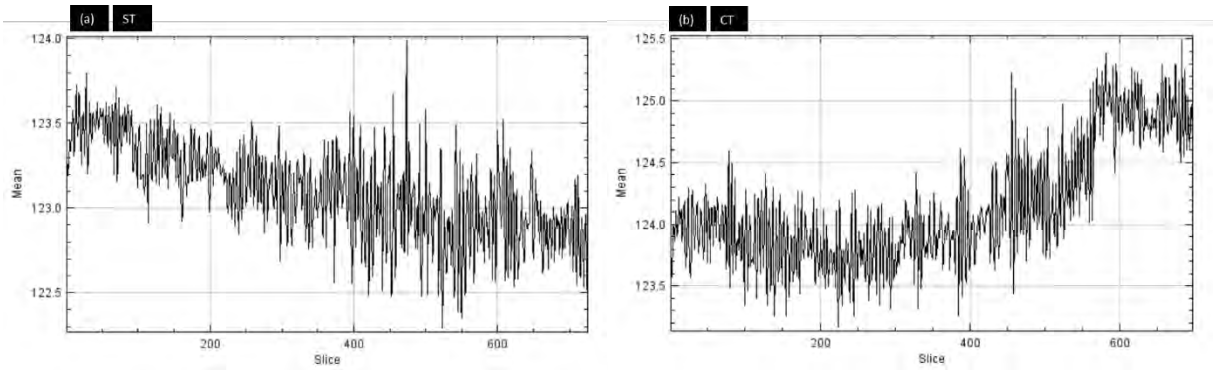


Fig. 5.14. Histograma de nivel de brillo en volumen de imagen TC rayos-X de madera *Acacia mangium* Willd. a) Histograma del tejido sin tratamiento, b) Histograma del tejido con termotratamiento, ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

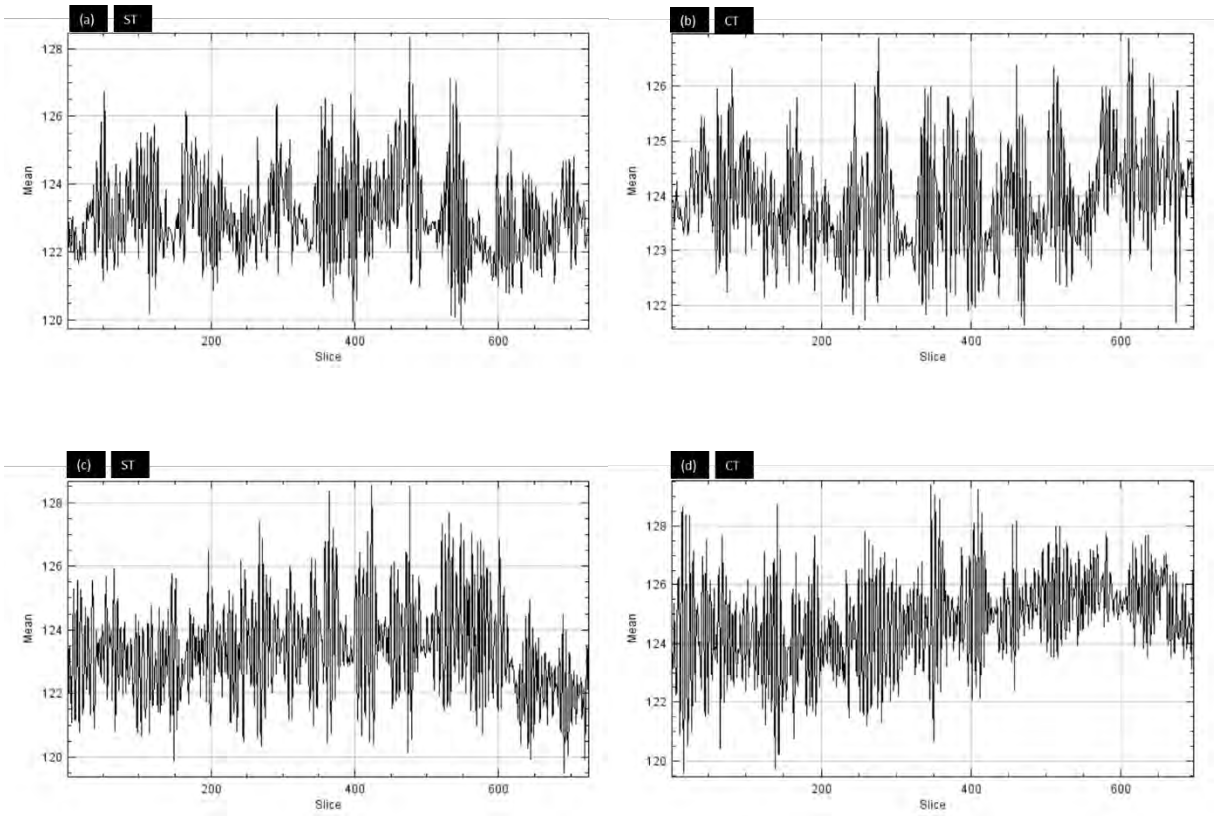


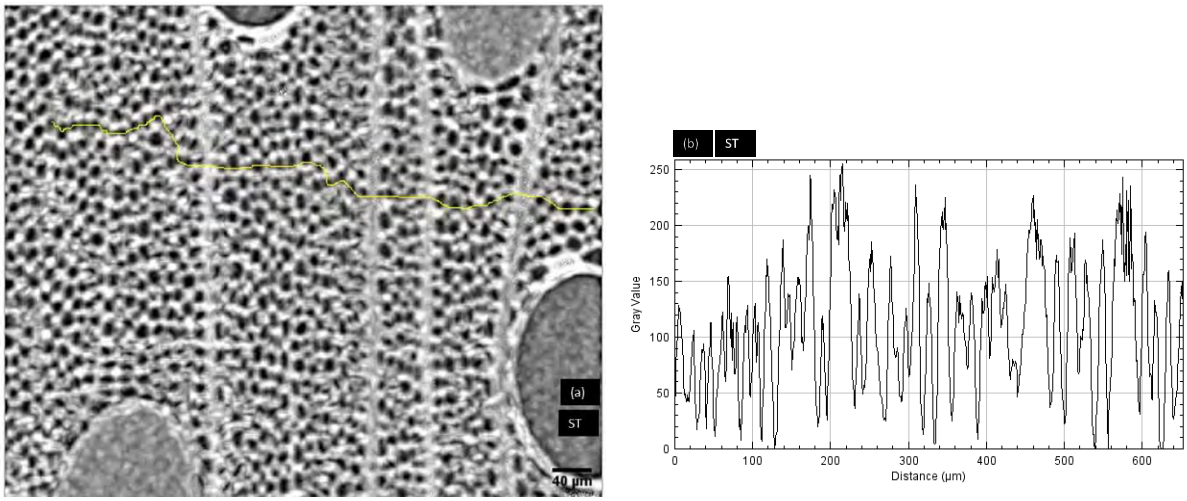
Fig. 5.15. Histograma de nivel de brillo, en volumen (eje z) de imagen TC-rayos X de madera *Acacia mangium* Willd sin vasos. a) Histograma del tejido ST1, b) Histograma del tejido CT1, c) Histograma del tejido ST2, d) Histograma del tejido CT2. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

En la Fig. 5.16 se muestra un corte virtual transversal de la madera ST (Fig. 5.16a) y CT (Fig. 5.16c) con las rutas de las mediciones de nivel de brillo sobre el tejido de la pared radial, indicadas con líneas amarillas sobre un solo corte 2D, es decir, el nivel de brillo directo sobre la ruta, no a través del volumen. Para la madera ST el trazo en pared radial arrojó una media de 98.83 (Fig. 5.16b) y para la madera CT el nivel de brillo tiene una media de 105.95 (Fig. 5.16d), lo que equivale a un incremento del 7.2 % sobre la pared radial (Cuadro 5.2).

En el trazo sobre la pared tangencial (Fig. 5.17) el nivel de brillo de la madera ST (Fig. 5.17a) arrojó una media de 194.43 (Fig. 5.17b). En el caso de la madera CT (Fig. 5.17c), para el nivel de brillo en pared tangencial, se obtuvo una media de 198.22 (Fig. 5.17d); el aumento en esta pared tangencial por termotratamiento fue del 1.94 % (Cuadro 5.2).

De acuerdo a estos resultados, es la pared radial de las fibras la que participó en una mayor compactación. En lo que respecta a la gran diferencia del valor de la media de nivel de brillo, entre la pared radial y tangencial, es debido a que, en la medición radial, la trayectoria se realizó cruzando los lúmenes de las fibras, al contrario de la medición tangencial donde no se cruzaron los lúmenes, arrojando lecturas muy superiores. En ambas mediciones los picos de mayor valor corresponden a los cruces con los radios medulares y el valor más bajo a los lúmenes. Excluyendo estos extremos, los valores para la pared radial oscilan entre 80-170 y en la pared tangencial entre 190-250.

La diferencia entre estos 2 rangos de valores refleja las diferencias entre la pared radial y tangencial. Al igual que en el trabajo de investigación en madera de *Eucalyptus nitens* abordado en el capítulo anterior, la pared tangencial en fibras de madera de *Acacia mangium* presenta también la sustancia que proviene del recubrimiento de células de parénquima radial, identificada como ATPF (Abultamiento Tangencial Parenquimatoso en Fibra). Al parecer este ATPF no es generado por la presencia de humedad en la madera, ya que a diferencia del estudio en el *Eucalyptus nitens*, las probetas de madera de *Acacia mangium* en la presente investigación fueron estabilizadas a estado anhidro.



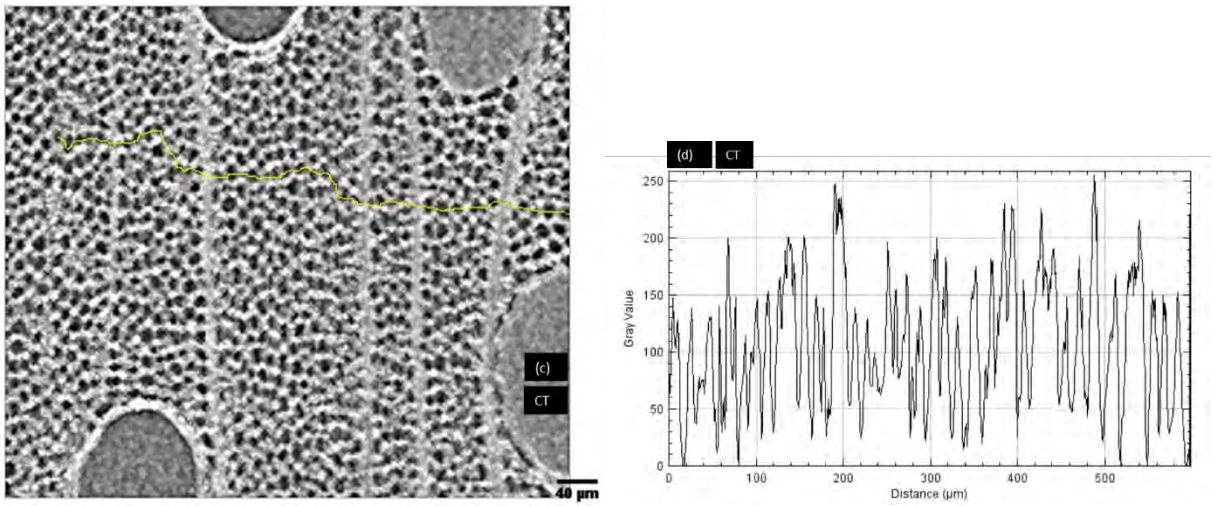


Fig. 5.16. Histogramas de nivel de brillo lineal en imágenes TC de madera *Acacia mangium* Willd. a) Trazo en pared radial del tejido ST, b) Histograma del tejido ST, c) Trazo en pared radial del tejido CT, d) Histograma del tejido CT. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

En la imagen de las Figs. 5.17a y 5.17c, es posible observar al ATPF presente en las paredes tangenciales de las fibras como engrosamientos de mayor luminiscencia y orientado en esta misma dirección.

En las Figs. 5.17a y 5.17c, también es posible observar el cambio del tejido celular después del termotratamiento como una degradación presente en el tejido (Fig. 5.17c), identificada como una marcada fragmentación en la continuidad del ATPF. Lo que finalmente se aprecia como una composición del ATPF a base de puntos más pequeños (Fig. 5.17c). De acuerdo a las imágenes, este efecto en la madera CT es la pérdida de materia en la pared celular, principalmente del ATPF, lo que contribuye a su adelgazamiento. La reducción y fragmentación del ATPF observado en madera termotratada como deterioro de los fragmentos con mayor luminiscencia en pared tangencial (Fig. 5.17c) probablemente podría ser una causa de varios de los cambios característicos reportados para este material. Como lo son: la pérdida de masa (Borrega & Kärenlampi, 2008; Gunduz *et al*. 2010) al disminuir el ATPF, la disminución de su densidad (Gunduz *et al*. 2010; Kamdem *et al*. 2002) al disminuir el ATPF disminuye también la masa por unidad de volumen, la pérdida de resistencia a flexión estática (Awoyemi & Jones, 2011; Altgen *et al*. 2012) al fragmentarse el ATPF se pierde continuidad en la resistencia con la que podría contribuir el ATPF, el aumento en la estabilidad dimensional (Aytin *et al*. 2015;

Bekhta & Niemz, 2003) al reducirse las diferencias entre la pared radial y la tangencial con la perdida de ATPF.

En las imágenes de la madera termotratada también se detectaron las deformaciones típicas en la pared de las fibras, señaladas dentro del círculo. Sin deformación en madera ST (Fig. 5.17c) y con deformación en madera CT (Fig. 5.17d). Además en estas mismas imágenes se observa, también dentro del círculo, la perdida de pared celular de parénquima paratraqueal en madera termotratada.

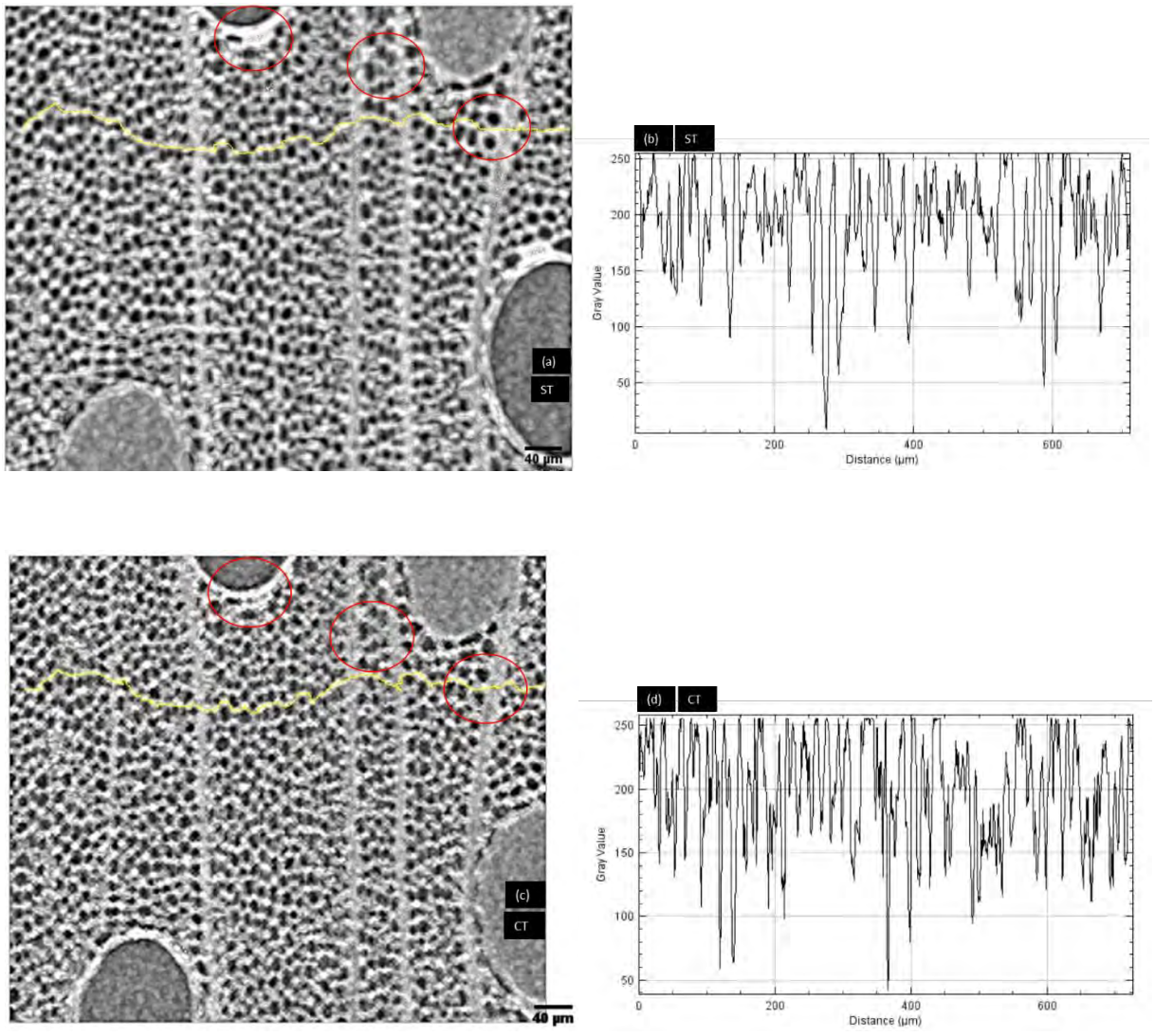


Fig. 5.17. Histogramas de nivel de brillo lineal en imágenes TC de madera *Acacia mangium* Willd. a) Trazo en pared tangencial del tejido ST, b) Histograma del tejido ST, c) Trazo en pared tangencial del tejido CT, d) Histograma del tejido CT. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

Los cambios provocados por el termotratamiento en el lumen del tejido fueron medidos en fracción de volumen. Sin embargo, en el volumen está implícita la dirección longitudinal de las fibras. Para tener información en términos únicamente de sección (2D), pero a través de la totalidad del volumen analizado, se evaluaron parámetros de área.

Los resultados indican que, con el termotratamiento, el área de poro en las fibras y parénquima paratraqueal disminuyó un 4% (Cuadro 5.3), por su parte se observa una disminución en la distribución de áreas mayores a 30 µm² y un aumento en la cantidad de lúmenes más reducidos (7.29 µm²) al pasar del 9% en madera ST a 15% en madera CT (Fig. 5.18). Esta reducción en el área del poro puede ayudar a contrarrestar los efectos negativos en la resistencia mecánica causados por el acercamiento entre lúmenes (porosidad por unidad de área). La media para madera ST y CT fue de 46.14 y 44.28 µm², respectivamente. En lo que respecta al parénquima paratraqueal, corresponden los valores con mayor área y está presente alrededor del 7% de la porosidad en fibra.

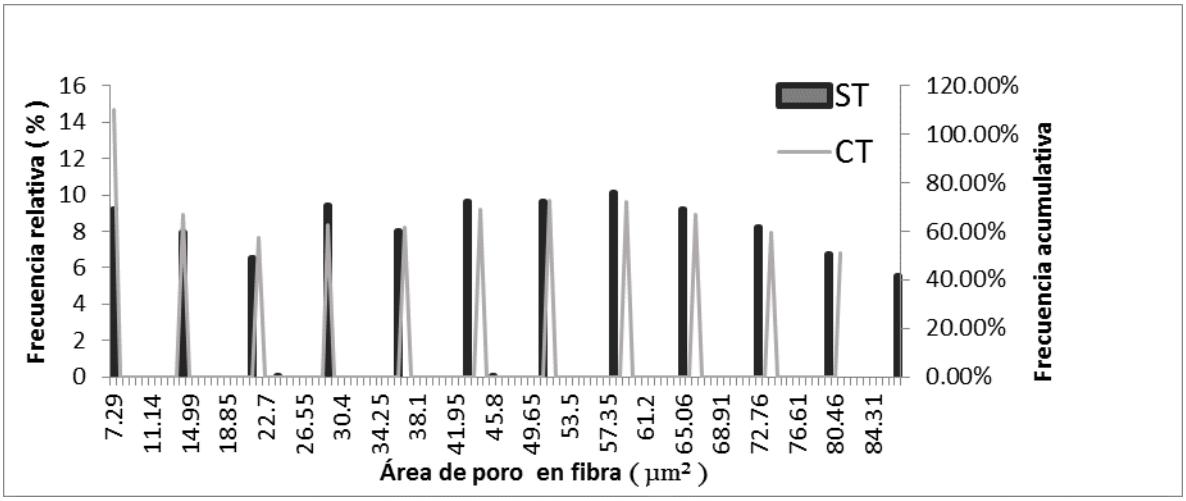


Figura 5.18. Histograma de frecuencia de área de poro en fibra de *Acacia mangium* Willd. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

El diámetro mínimo de Feret en la porosidad de la fibra presentó un comportamiento similar al área, concentrando más lúmenes de menor diámetro (2.2 µm) en madera CT, al pasar del 18%

al 23% (Fig. 5.19) y al disminuir la concentración de los de mayor diámetro (5.8, 8.0 µm). Sin embargo, el diámetro detectó 3 tipos principales de lumen en las fibras (3 diferentes fibras): las de 2.4, 5.3 y 7.7 µm de diámetro en poro. El aumento en madera CT podría ser proporcional a la deformación por termotratamiento. El valor de la media para madera ST y CT fue del 6.37 y 6.38 µm (Cuadro 5.3), valores cercanos al 3.3 y 12.0 µm reportados por Hegde *et al*. (2013) para esta especie.

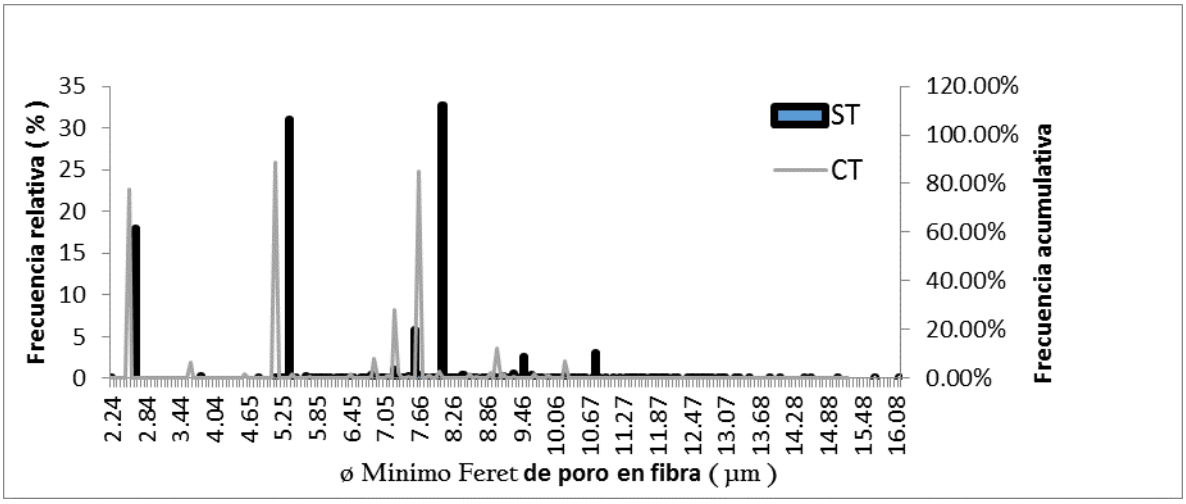


Figura 5.19. Histograma de frecuencia de diámetro mínimo de Feret de poro en fibra de *Acacia mangium* Willd. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

El valor de la circularidad en los poros de las fibras disminuyó un 6%, al pasar del 0.947 en ST a 0.890 para CT (Cuadro 5.3). Esta disminución en la circularidad corresponde a los efectos de deformación en el lumen por el termotratamiento y se aproxima al aumento de diámetros menores de Feret (5%) señalados anteriormente como estimadores de la deformación en el tejido. En cuanto a la distribución de valores, en la madera ST arrojó una concentración de lúmenes circulares del 75%, únicamente un 25% con algún grado de deformación por crecimiento o secado, el cual se distribuye uniformemente con aproximadamente valores inferiores al 2%, hasta alcanzar un mínimo de circularidad del 0.11 (Fig. 5.20). Para la madera CT la cantidad de lúmenes circulares disminuyó considerablemente, obteniendo una concentración del 55% únicamente, el resto se distribuyó en valores inferiores al 4%, hasta un mínimo del 0.15 (Fig. 5.21). Esto indica que un 20% más de lumen experimentó algún grado de deformación por el termotratamiento.

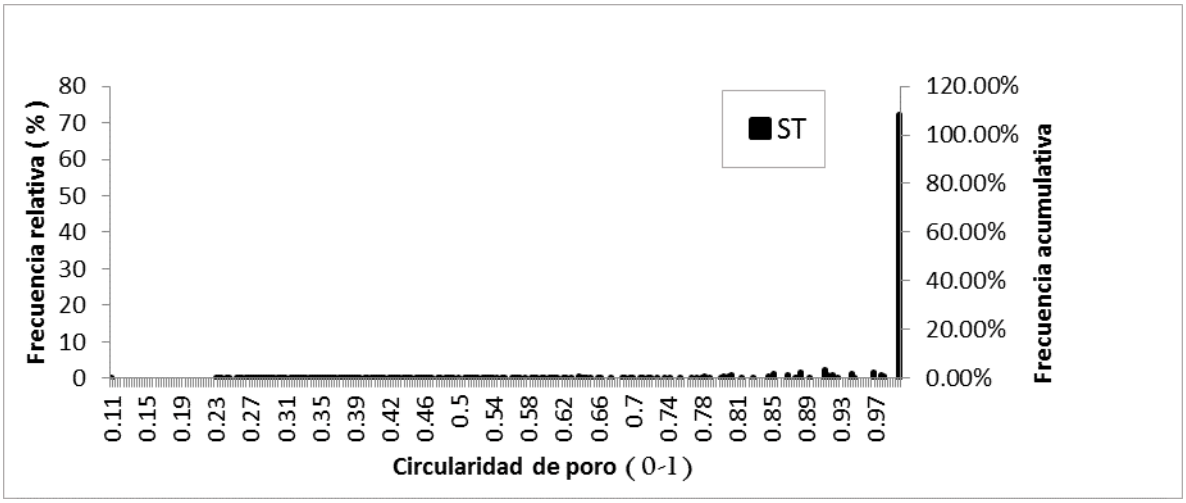


Figura 5.20. Histograma de frecuencia de circularidad de poro en fibra de *Acacia mangium* Willd ST= Sin termotratamiento.

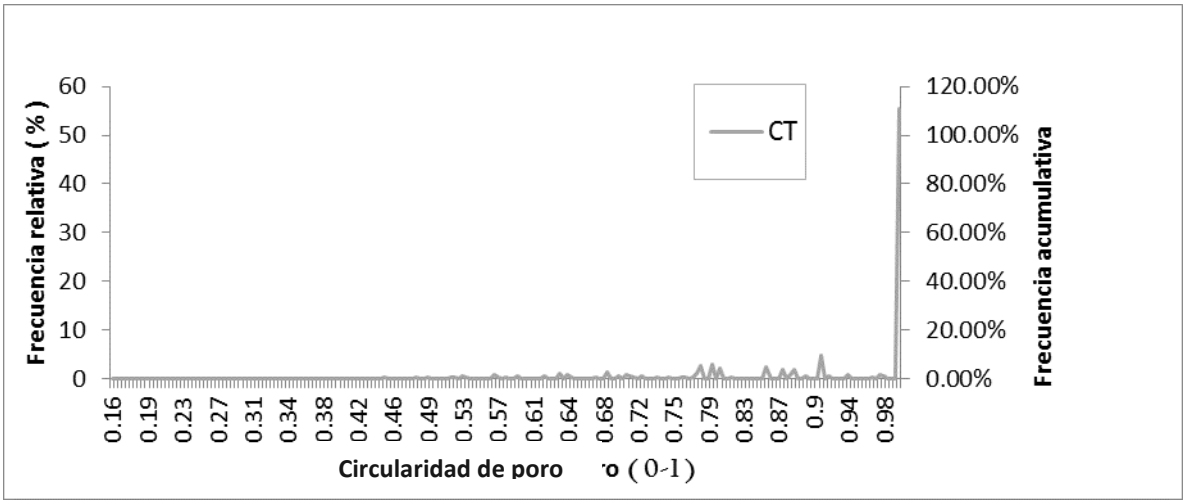


Figura 5.21. Histograma de frecuencia de circularidad de poro en fibra de *Acacia mangium* Willd CT= Con termotratamiento.

La solidez en la pared de la fibra disminuyó del 0.89 al 0.85 respectivamente para madera ST y CT (Cuadro 5.3), únicamente un 4.5%; por lo tanto, se presenta ligeramente mayor deformación en el lumen de las fibras que en la pared celular por el termotratamiento. Sin embargo, a diferencia de los poros, en la pared celular únicamente el 33% presenta una solidez de 1 en madera ST y un 27% en madera CT, el resto de la pared tiene deformación en algún grado. En la madera termotratada, la cantidad de pared afectada aumentó en un 6%, en los histogramas de

ST (Fig. 5.22) y CT (Fig. 5.23) podemos observar a 5 principales tipos de deformación en la pared, el más evidente: de 0.66 en madera CT, que alcanza el 5%. Estos histogramas muestran que las deformaciones características ya existentes en la madera ST se acentúan ligeramente con el termotratamiento.

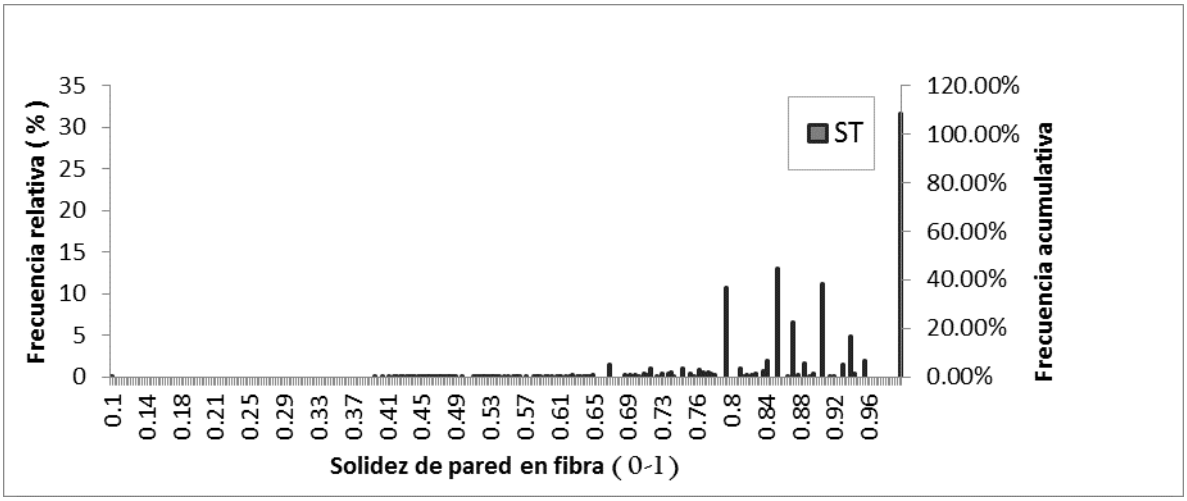


Figura 5.22. Histograma de frecuencia de solidez de pared en fibra de *Acacia mangium* Willd ST= Sin termotratamiento.

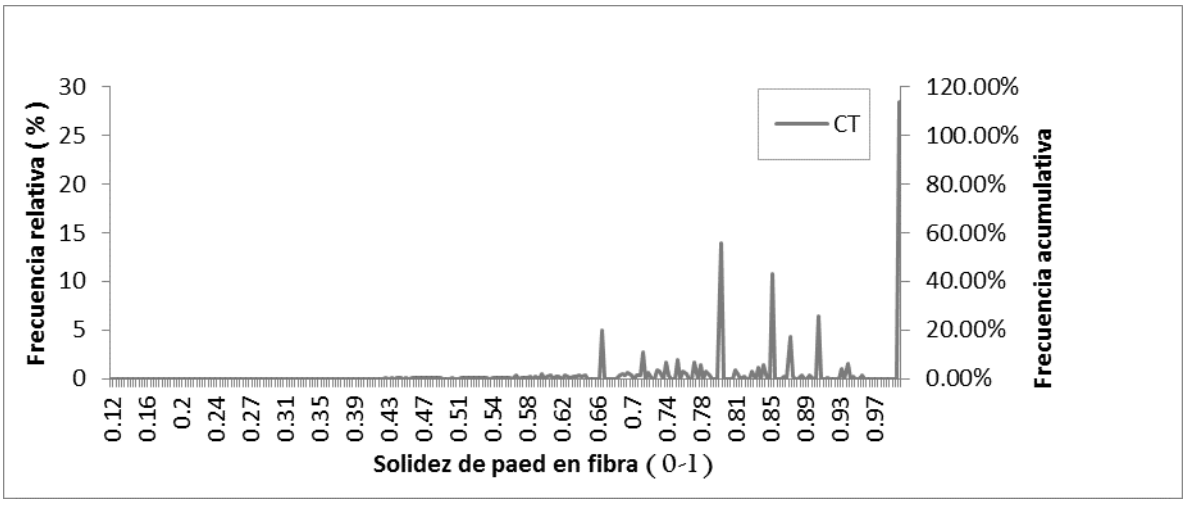


Figura 5.23. Histograma de frecuencia de solidez de pared en fibra de *Acacia mangium* Willd CT= Con termotratamiento.

El área en la porosidad de los vasos aumentó su media de 13723.5 µm² en madera ST a 14325.7 µm² después del termotratamiento (Cuadro 5.4), equivalente al 4.4% de incremento. El incremento de área en los vasos podría tener 2 efectos mediáticos en la madera. Primero: disminución de resistencia mecánica (Korkut, & Budakçı, 2009), debido al incremento de porosidad por unidad de área, y segundo: la permeabilidad en los poros podría aumentar (Vernois, 2001), debido a que los vasos son el principal conducto de fluidos en la madera. Las 2 características son propias de lo reportado en madera termotratada.

Esta madera presentó gran variedad de tamaños en el poro (Fig. 5.24) de los vasos, los cuales se modificaron un poco en madera termotratada, principalmente hacia los poros con menor área.

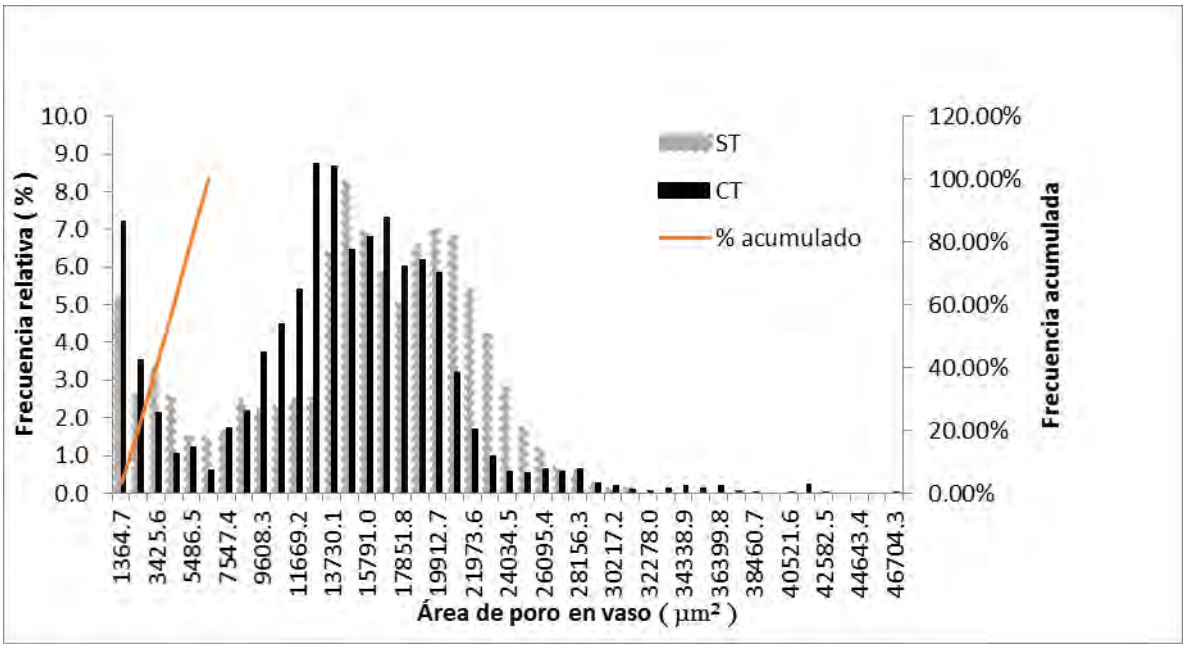


Figura 5.24. Histograma de frecuencia de área de poro en vaso de *Acacia mangium* Willd. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

El diámetro mínimo de Feret presentó un comportamiento muy similar al área (Fig. 5.25), con gran variedad de tamaños y formando dos subgrupos: uno con diámetros cercanos a los 38 µm en menor cantidad y el principal con diámetros cercanos a los 123 µm. El incremento del diámetro en madera termotratada fue del 0.53% (Cuadro 5.4), al parecer este parámetro es menos sensible a detectar los cambios en la sección de los poros que el área.

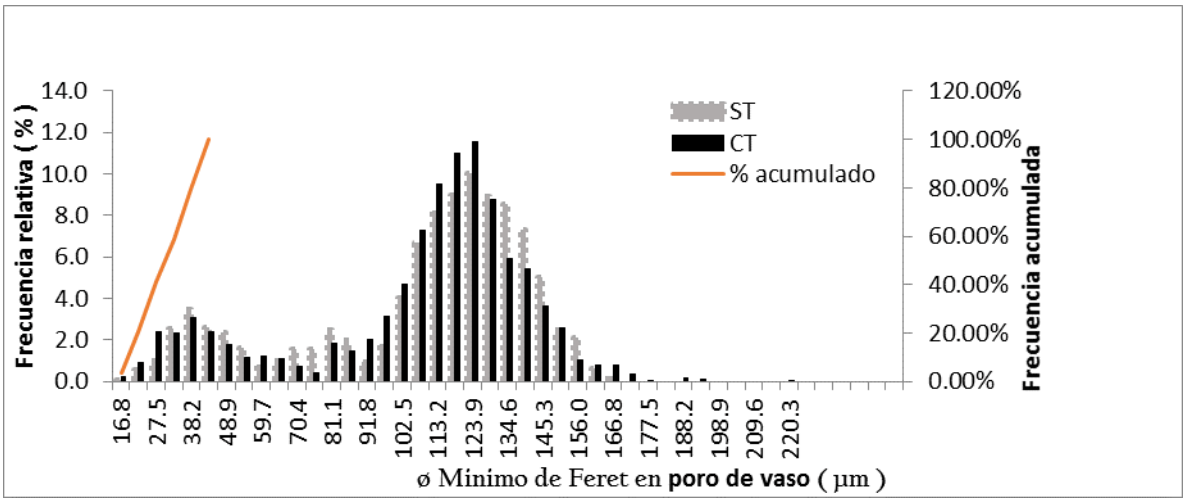


Figura 5.25. Histograma de frecuencia de diámetro mínimo de Feret de poro en vaso de *Acacia mangium* Willd. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

La circularidad en el poro de madera ST presentó una media de 0.75 y después del termotratamiento de 0.76, el incremento en CT es del 0.8% (Cuadro 5.4). Prácticamente, la forma elíptica en los poros se mantuvo constante después del tratamiento, así como la distribución de las deformaciones (Fig. 5.26).

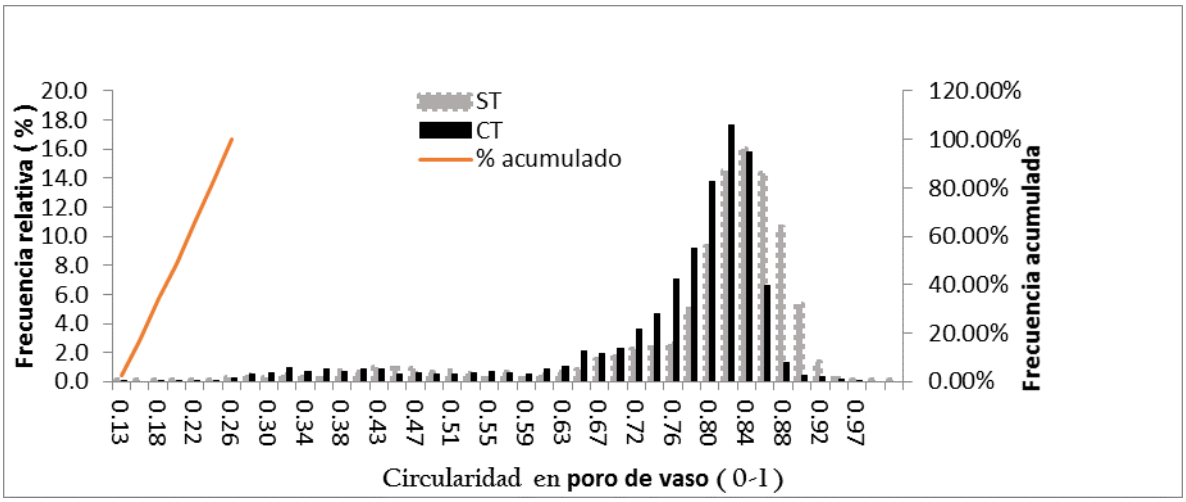


Figura 5.26. Histograma de frecuencia de circularidad de poro en vaso de *Acacia mangium* Willd. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

La solidez del vaso no presentó cambios en la distribución de su deformación (Figs. 5.27, 5.28). La media de este parámetro resultó de 0.93 para madera ST y de 0.94 en madera CT (Cuadro

5.4). La pequeña deformación presentada en la pared del vaso puede atribuirse a su estructura natural.

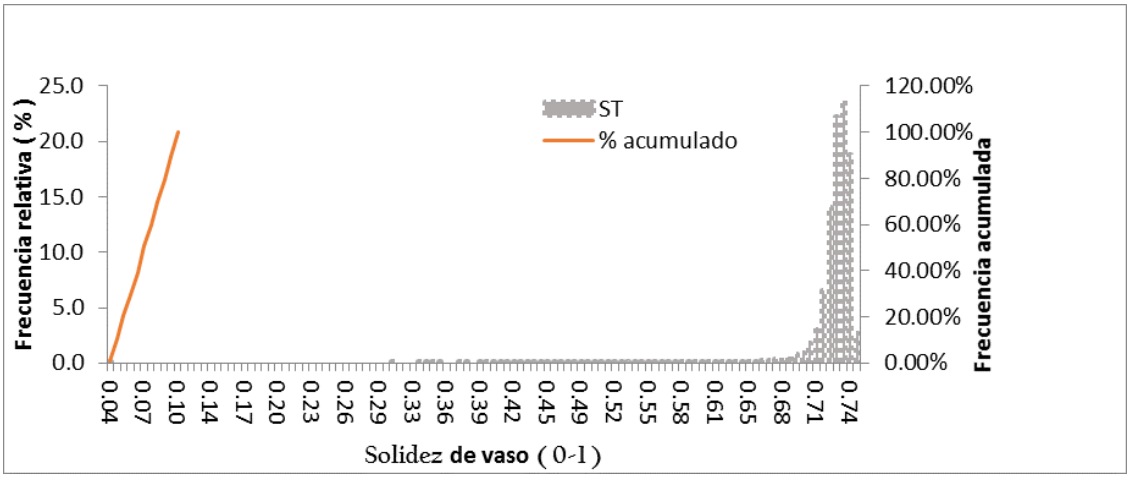


Figura 5.27. Histograma de frecuencia de solidez de pared en vaso de *Acacia mangium* Willd ST= Sin termotratamiento.

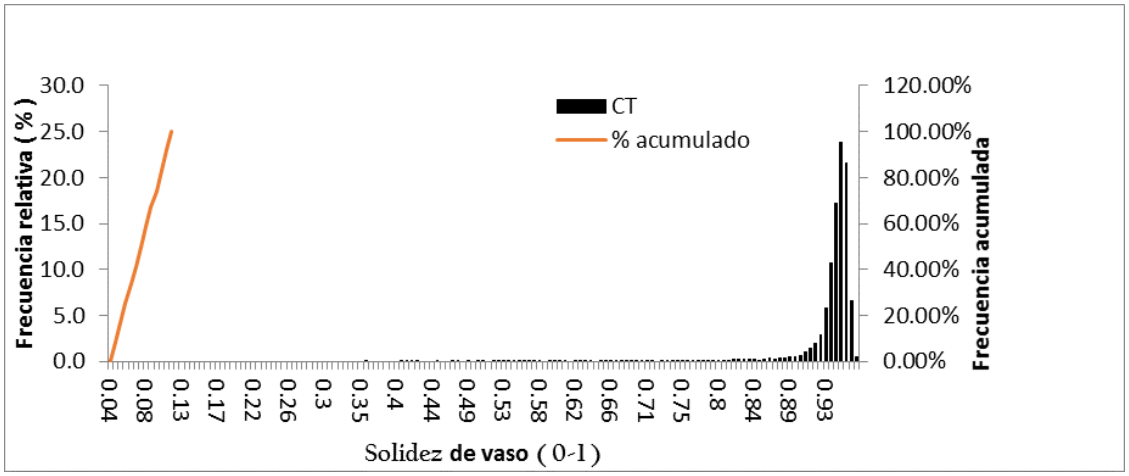


Figura 5.28. Histograma de frecuencia de solidez de pared en vaso de *Acacia mangium* Willd CT= Con termotratamiento.

El espesor de pared celular de las fibras presentó dos categorías principales: la primera con un espesor de 2.7 µm, al parecer corresponde a la pared radial, y la segunda con 5.5 µm a la pared tangencial. La distribución de estos valores se modificó para la madera CT (Fig. 5.29), incrementándose la cantidad de paredes con 2.7 µm, del 31.1% en madera ST al 47.0% en madera CT y las de 5.5 µm disminuyeron del 66.4% en madera ST, al 52.66% en madera CT (Fig. 5.29). Estos cambios en la pared corresponden al aumento de paredes más delgadas debido a la degradación en la pared del ATPF ya mostrada en las imágenes anteriormente. La pérdida

de espesor en la pared celular es una reducción directa, en la sección de carga del material. Este podría ser uno de los principales factores que disminuyen la resistencia en la madera termotratada. En la Fig. 5.29 también podemos observar cómo la diferencia entre las dos categorías (pared radial y tangencial) se reduce en la curva de madera CT. Esto significa reducción entre tamaños de pared celular e indica generalmente menor anisotropía en la madera, lo que tiene como consecuencia mayor estabilidad dimensional del material. En la literatura se reporta que la madera termotratada tiene como principal característica el mejoramiento en su estabilidad dimensional (Esteves & Pereira, 2009). En la presente investigación (Fig. 5.29), es en la categoría de 5.5 µm (pared tangencial) en donde se dan las pérdidas de pared celular. Esta pérdida coincide con la pérdida de ATPF sobre la pared tangencial, observada en imágenes anteriores. La media de este parámetro fue de 4.62 µm, cercano al 4.3 µm reportado por Hegde *et al*. (2013).

La relación de fracciones de volumen entre las distintas fases en la madera se modificó debido al termotratamiento (Cuadro 5.5). En el total del volumen analizado, la relación entre la cantidad de porosidad y tejido prácticamente se invirtió, pasando del 49.4 al 56.6 % de tejido y del 50.5 al 43.4 % de porosidad para madera ST y madera CT, respectivamente. Los cambios en esta relación se modificaron debido a que la fase porosa se redujo por el termotratamiento, aun cuando la pared también se contrajo. Al parecer, es la deformación de las paredes de fibra la responsable de la marcada reducción en el lumen, y no del todo la contracción en el tejido.

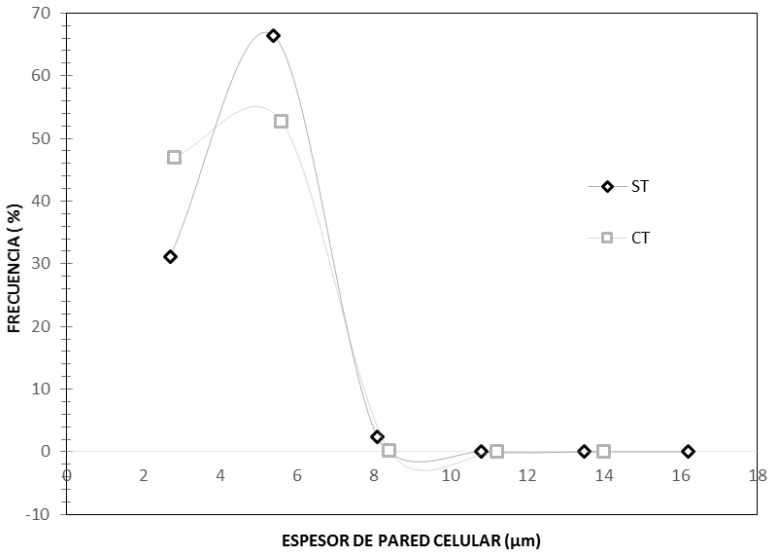


Figura 5.29. Histograma de frecuencia de espesor de pared en fibra de *Acacia mangium* Willd. ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento.

La relación de lumen de vasos pasó del 19 al 20 %, no obstante la reducción porosa en las fibras, este incremento es por la degradación interna de su pared y porque su área y diámetro mínimo de Feret no disminuyeron, alterando significativamente la relación entre las distintas fases. La relación de los lúmenes de los radios pasaron de 5.4 a 3.8 %, este dato también indica una reducción en los radios por compactación. Sin embargo, de acuerdo a estos resultados, es el lumen de las fibras el que mayormente contribuye a estos cambios y el que más se reduce.

La fracción de volumen en los vasos después del termotratamiento indica que esta madera no perdió la capacidad de conducción en los mismos y mostró un incremento. En madera termotratada se ha observado que gana y pierde humedad con gran facilidad (Vernois, 2001), esto coincide con el aumento en la capacidad de conducción en sus vasos. En cuanto a las fibras, es muy posible que la capacidad de almacenamiento de líquidos disminuya de acuerdo a los resultados obtenidos.

La densidad teórica aumentó en la madera termotratada, esto coincide con las mediciones realizadas en el nivel de brillo de la pared celular. Este aumento indica una compactación de la pared celular. En la madera ST, la densidad teórica fue de 0.741 $g \cdot cm^{-3}$ y en madera CT aumentó a 0.849 $g \cdot cm^{-3}$ (Cuadro 5.5). Generalmente, la densidad básica disminuye en la madera termotratada, pero de acuerdo a lo visto en esta investigación, es probable que disminuya por la pérdida de masa en el ATPF, aun cuando la porosidad se reduzca y la pared se compacte (aumente su densidad teórica).

La tortuosidad de los vasos disminuyó de 1.18 en madera ST a 1.16 en madera CT (Cuadro 5.5), la menor tortuosidad en vasos de madera termotratada puede ser por la degradación superficial de su pared o platina, observadas en imágenes anteriores. Un ducto menos tortuoso facilita el flujo de fluidos y la permeabilidad misma en un material. Los resultados obtenidos de permeabilidad muestran un ligero aumento en la madera termotratada (Cuadro 5.5), los vasos ST arrojaron un valor del 4.60 x 10^{-11} de resistencia al flujo por m^2 y los vasos CT una permeabilidad de 5.09 x 10^{-11} m^2, el incremento en permeabilidad es de un 10.6%. Probablemente este incremento es el que facilita que la madera termotratada gane o pierda con facilidad humedad, como ha sido reportado por otros autores.

Los resultados de permeabilidad en vasos y de permeabilidad en todo el tejido (5.13 x 10^{-11}) mostraron muy poca diferencia (Cuadro 5.5), probablemente por la resolución empleada que no

definió con claridad las puntuaciones en las fibras o por la poca permeabilidad en ellas. El incremento fue del 0.78% en la permeabilidad de todo el tejido, respecto de la simulación solo con vasos.

Cuadro 5.2. Nivel de brillo en imágenes TC rayos-X de madera de *Acacia mangium* Willd

Medida	ST	CT	ST1	CT1	ST2	CT2	ST	CT	ST	CT
	Bz	*Bz*	Bz^f	Bz^f	Bz^f	Bz^f	Br^f	Br^f	Bt^f	Bt^f
	(0-255)	(0-255)	(0-255)	(0-255)	(0-255)	(0-255)	(0-255)	(0-255)	(0-255)	(0-255)
Media	123.10	124.15	123.07	123.89	123.30	124.78	98.83	105.95	194.43	198.22
SD	0.28	0.48	1.25	0.95	1.53	1.61	53.61	55.45	46.13	42.77
Max	123.98	125.49	128.32	126.88	128.53	129.39	250.70	255.00	255.00	255.00
Min	122.30	123.17	119.86	121.64	119.51	119.60	0.00	0.00	8.608	42.00
N	724	696	724	696	724	696	276	744	916	903

Nota: ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento; *Bz* = Nivel de brillo volumétrico, Bz^f = Nivel de brillo volumétrico sin pared de vaso, Br^f = Nivel de brillo lineal en pared radial de fibra, Bt^f = Nivel de brillo lineal en pared tangencial de fibra.

Cuadro 5.3. Caracterización geométrica de madera de *Acacia mangium* Willd en imágenes TC rayos-X

Medida	ST	CT	ST	CT	ST	CT	ST	CT
	Sp^f (μm^2)	Sp^f (μm^2)	$Øf^mp^f$ (μm)	$Øf^mp^f$ (μm)	$◯p^f$ (0-1)	$◯p^f$ (0-1)	Sw^f (0-1)	Sw^f (0-1)
Media	46.14	44.28	6.37	6.38	0.94	0.89	0.89	0.85
SD	23.98	25.21	2.23	2.49	0.11	0.15	0.09	0.12
Max	87.52	86.27	16.20	16.16	1.00	1.00	1.00	1.00
Min	7.29	7.84	2.23	2.44	0.11	0.15	0.09	0.12
N	2190484	2223070	2190484	2223070	2190484	2223070	2190484	2223070

Nota: ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento; Sp^f = Área de poro en fibra, $Øf^mp^f$ = Diámetro mínimo Feret de poro en fibra, $◯p^f$ = Circularidad de poro en fibra, Sw^f = Solidez de pared en fibra.

Cuadro 5.4. Caracterización geométrica de madera de *Acacia mangium* Willd en imágenes TC rayos-X

Medida	ST Sp^v (μm^2)	CT Sp^v (μm^2)	ST $Øf^m p^v$ (µm)	CT $Øf^m p^v$ (µm)	ST $◯p^v$ (0-1)	CT $◯p^v$ (0-1)	ST Sw^v (0-1)	CT Sw^v (0-1)
Media	13723.5	14325.7	109.78	110.37	0.75	0.76	0.94	0.94
SD	5931.5	6677.3	34.30	34.75	0.13	0.13	0.05	0.04
Max	28173.7	47734.7	169.82	225.65	0.97	0.98	0.97	0.97
Min	1363.8	1364.7	16.20	16.80	0.13	0.13	0.05	0.04
N	11943.0	11441.0	11943.00	11441.00	11943.00	11441.00	11943.00	11441.00

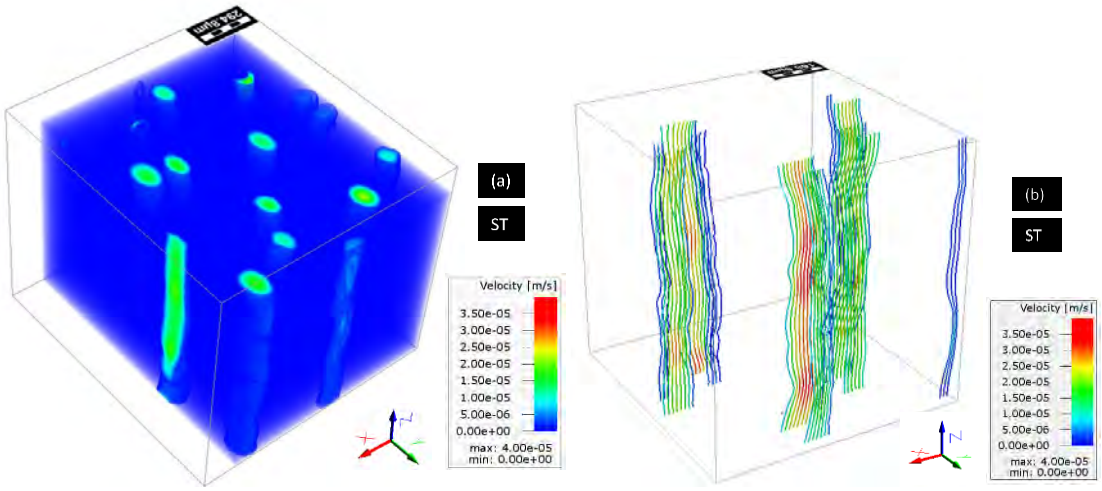
Nota: ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento; Sp^v = Área de poro en vaso, $Øf^m p^v$ = Diámetro mínimo Feret de poro en vaso, $◯p^v$= Circularidad de poro en vaso, Sw^v = Solidez de pared en vaso.

Cuadro 5.5. Caracterización geométrica de madera de *Acacia mangium* Willd en imágenes TC rayos-X

Media	Vs (%)	Vp (%)	Vv (%)	Vr (%)	K_l (m^2)	K_l (m^2)	T_l	ew^f (µm)	ρT ($g \cdot cm^{-3}$)
ST	49.40	50.60	19.15	5.47	4.60 e^{-11}	---	1.18	4.62	0.74
CT	56.60	43.40	20.36	3.88	5.09 e^{-11}	5.11 e^{-11}	1.16	4.29	0.85

Nota: ST= Sin termotratamiento, CT= Con termotratamiento; ew^f= espesor de pared fibra, Vp= fracción de volumen poroso, Vs= fracción de volumen sólido, Vv = fracción de volumen poroso de vasos, Vr = fracción de volumen poroso de radios, K_l = permeabilidad longitudinal, T_l = tortuosidad longitudinal, ρT = densidad teórica.

No se detectaron variaciones en la velocidad de flujo en ninguna de las simulaciones. La velocidad máxima se presentó al centro de los vasos, en la región que pudiera corresponder a la menor fricción en el fluido. En las Figs. 5.30a y 5.30b observamos la permeabilidad en los vasos ST y en las Figs. 5.30c y 5.30d, a la permeabilidad en vasos CT. En las imágenes no se aprecian cambios considerables. En las Figs. 5.30e y 5.30f, que corresponde a la simulación con todo el tejido ST presente, se observan las líneas de flujo en los vasos y además en las fibras, al parecer las líneas de flujo en las fibras lograron una penetración en forma alineada tangencialmente, probablemente con puntuaciones en los radios. La velocidad máxima de flujo en los 3 casos fue de 4.0 x 10^{-5}.



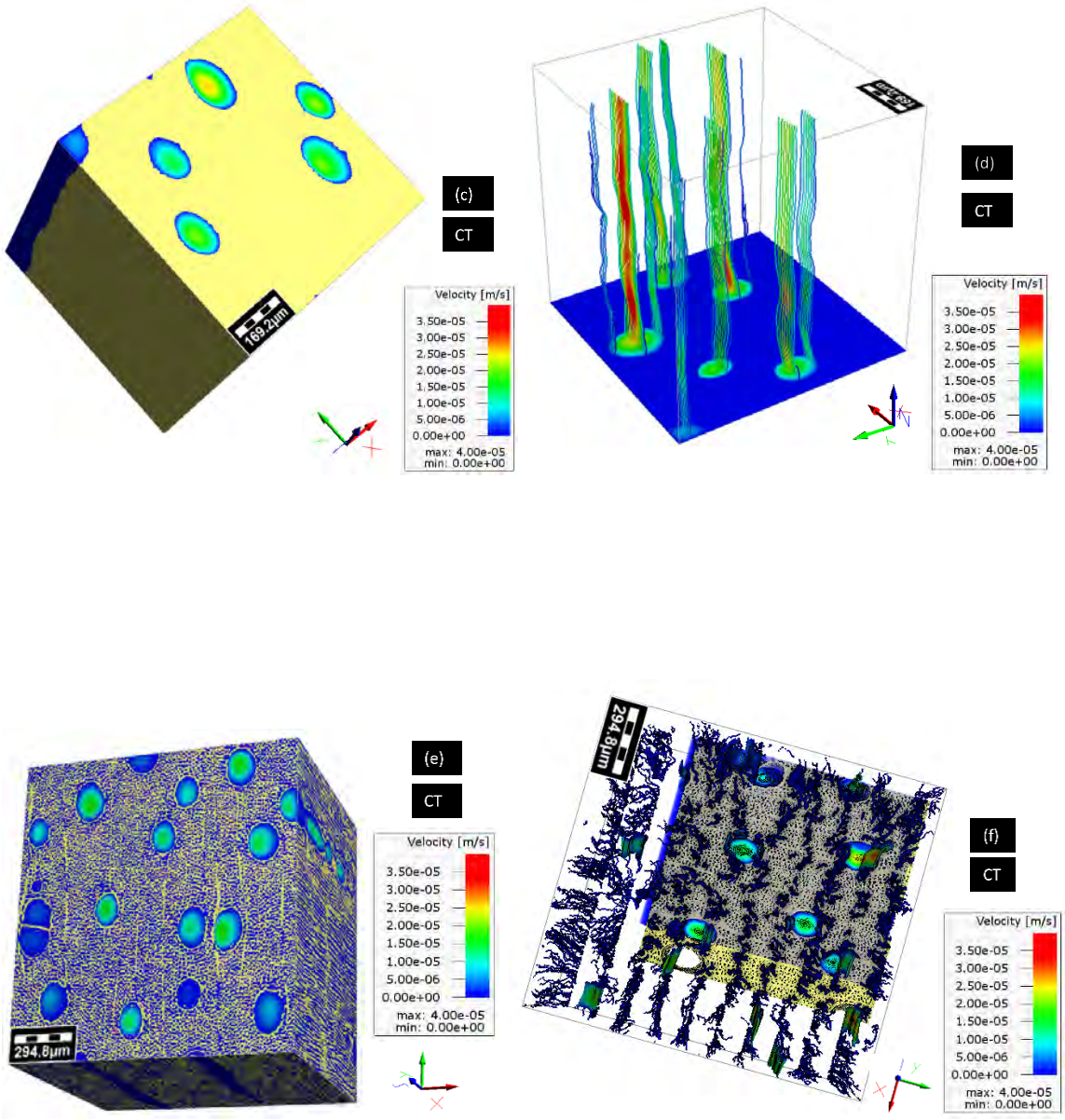


Figura 5.30.; Simulación de permeabilidad CFD en Imágenes de TC-rayos X de madera de *Acacia mangium* Willd. (a, b) Simulación en vasos de corte virtual de madera ST, (c, d) Simulación en vasos de corte virtual de madera CT, (e, f) Simulación en el total del tejido de un corte virtual de madera CT. ST= Madera sin termotratamiento, CT= Madera con termotratamiento.

5.5 CONCLUSIONES

El análisis realizado arroja cambios en la microestructura de la madera termotratada. La pared celular presentó degradación principalmente sobre la cara tangencial de las fibras en el Abultamiento Tangencial Parenquimatoso en Fibra (ATPF), las superficies del parénquima paratraqueal y la pared de vaso. La degradación en la pared tangencial podría estar relacionada con el aumento en estabilidad dimensional y pérdida de resistencia mecánica

El nivel de brillo del tejido termotratado se incrementó 1.19% sobre la madera ST; esto es un indicio de una compactación en la pared celular. Al igual que el nivel de brillo de la pared radial en madera CT, se incrementó el 7.2% sobre sí misma.

Los valores de nivel de brillo de la pared tangencial fueron superior que el nivel en la radial debido a la presencia del ATPF.

Se obtuvo una pérdida de espesor de pared de fibra después del termotratamiento, la cual es atribuida a la cara tangencial en el ATPF de acuerdo a la degradación observada en las imágenes y a la medición en 3D.

El área de la porosidad en las fibras disminuyó en madera CT un 4% y se concentró una mayor cantidad con diámetros mínimos de Feret menores que en madera ST. Esta reducción ayuda a contrarrestar el efecto del acercamiento entre poros en una sección.

La deformación en madera CT se evaluó con una disminución de circularidad de poro del 6% y la deformación en la pared con una pérdida del 4.5. Esta deformación contribuyó en buena medida a la reducción de la fase porosa en fibra.

Los vasos presentaron un incremento en su área del 4.4% y en su diámetro del 0.53%. Este incremento podría ser causado por la degradación superficial de sus paredes y porque no muestra deformación con el termotratamiento. Además, podría tener relación con la disminución de tortuosidad y el aumento de permeabilidad presentada.

La deformación en los vasos disminuyó. Se obtuvo un incremento en circularidad del 0.84% y de solidez 1%.

La relación de fracción de volumen en el tejido se modificó, pasando del 49.4 al 56.6% la fase sólida y del 50.5 al 43.4% en madera ST y CT respectivamente. Esta modificación en las fases no necesariamente incrementa la densidad básica, ya que existe pérdida de masa.

La densidad teórica se incrementó en la madera CT el 14.5%. Tales incrementos obedecen al parecer a la compactación de la pared y la reducción en porosidad de fibra.

En los vasos de la madera CT disminuyó la tortuosidad y se incrementó la permeabilidad 10.6%, esta condición no necesariamente mejora la permeabilidad en las fibras significativamente, pero sí en los vasos de la madera.

La tomografía computarizada de rayos-X demostró ser una técnica útil para el análisis de cambios en la madera.

6. CONCLUSIONES GENERALES

Las 2 especies presentaron significativamente en su tejido a la sustancia identificada como Abultamiento Tangencial Parenquimatoso en Fibra (ATPF), este es un factor común entre 2 microestructuras con antecedentes de problemas por tensión en el secado.

Las microestructuras en las 2 especies observaron deformaciones, en el *Eucalyptus nitens,* además, se detectaron microfisuras y en la *Acaia mangium* las deformaciones se agravaron ligeramente con el termotratamiento.

Los distintos descriptores de la geometría en la imagen lograron evaluar en cualquier región o punto de interés, las características de la madera.

Los aspectos cuantitativos de la microestructura evaluados describen congruentemente los observados cualitativamente con la técnica de tomografía, como lo son las deformaciones, grietas o fracciones de volumen.

De acuerdo a los resultados, la técnica distinguió las diferencias entre los 2 tejidos de las especies analizadas congruentemente. Se identificó al tejido de *Eucalyptus nitens* con mayores problemas que el de *Acacia mangium.*

Los valores obtenidos con la microtomografía tienen similitud en buena medida con los reportados en la literatura donde se utilizaron técnicas tradicionales de caracterización 2D.

Se demostró que las mediciones realizadas con la técnica fueron consistentes, al analizar tres cortes diferentes del *Eucalyptus nitens.*

La ejecución de los distintos algoritmos en el tratamiento de imágenes se efectuó relativamente rápido, a excepción de las simulaciones de permeabilidad. Sin embargo, la permeabilidad presentó tendencias proporcionales e inversamente proporcionales a otros parámetros de rápida medición, como la tortuosidad o conectividad.

La observación de los objetos en la imagen estuvo limitada hasta aproximadamente la mitad del tamaño del voxel empleado.

La capacitación para el manejo de la técnica, el uso de equipo especializado y el reducido campo de visión de estudio, son desventajas de la técnica. Por otra parte, la automatización

en las mediciones, la precisión en las mismas, la caracterización tridimensional, la segmentación de fases, son solo algunas de las más destacadas ventajas de la caracterización por microtomografía de rayos-X.

7. REFERENCIAS

Alfonso, V. A., Wheeler, E. A., Baas, P., & Gasson, P. E. (Eds.). (1989). IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification: With an Appendix on Non-anatomical Information. Published for the International Association of Wood Anatomists at the Rijksherbarium.

Aaltosalmi, U. (2005). *Fluid flow in porous media with the lattice-Boltzmann method*. Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy. University of Jyväskylä. Jyväskylä, Finland.72 p.

Altgen M, Adamopoulos S, Viikari J A, Hukka A, Tetri T y Militz H. (2012). Factors Influencing the Crack Formation in Thermally Modified Wood. In: Session Three: Thermal modification 1 Proceedings / The Sixth European Conference on Wood Modification, Ljubljana, Slovenia, (pp. 149-158).

Ananías, Rubén A, Diaz, Cinthya, & Leandro, Laura. (2009). Estudio preliminar de la contracción y el colapso en *Eucalyptus nitens*. Maderas. Ciencia y tecnología, 11(3), 251-260. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2009000300007

Awoyemi, L., & Jones, I. P. (2011). Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment.Wood science and technology, 45(2): 261-267.

Aytin, A., Korkut, S., Ünsal, Ö., & Çakıcıer, N. (2015). The effects of heat treatment with the ThermoWood® method on the equilibrium moisture content and dimensional stability of wild cherry wood. *BioResources*, *10*(2), 2083-2093.

Baecker, V. (2010). Image processing and analysis with Image J and MRI Cell Image Analyzer. *Montpellier RIO Imaging*, 1-93.

Ballesteros-Cánovas, J. A., Guardiola-Albert, C., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., & Rodríguez-Morata, C. (2013) June. Aplicación de la tomografía axial computarizada (TAC) para el análisis de la estructura interna de árboles afectados por avenidas torrenciales. VI Congreso Forestal Español.

Bárcenas-Pazos, G. M., Ortega-Escalona, F., Ángeles-Álvarez, G., & Ronzón-Pérez, P. (2014). Relación estructura-propiedades de la madera de angiospermas mexicanas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *21*(42).

Batista, Djeison Cesar, Paes, Juarez Benigno, Bolzón de Muñiz, Graciela Ines, Nisgoski, Silvana, & da Silva Oliveira, José Tarcísio. (2015). Microstructural aspects of thermally modified *Eucalyptus grandis* wood. Maderas. Ciencia y tecnología, 17(3),

525-532. Epub 30 de junio de 2015.https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000047

Bekhta, P., & Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood.Holzforschung, 57(5): 539-546.

Biechele, T., Nutto, L., & Becker, G. (2009). Growth strain in *Eucalyptus nitens* at different stages of development. Silva Fennica, 43(4), 669-679.

Bodig, J., & Jayne, B. A. (1982). Mechanics of Wood and Wood Composites Van Nostrand Reinhold Company. *New York*.

Boonstra, M.J, Rijsdijk, J.F, Sander, C, Kegel, E, Tjeerdsma, B, Militz, H, Van Acker, J, & Stevens, M. (2006). Microstructural and physical aspects of heat treated wood. part 1. softwoods. Maderas. Ciencia y tecnología, 8(3), 193-208. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2006000300006

Boonstra, M.J; Acker, J.; Tjeerdsma, B.F., & Kegel, E. (2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. Annals of Forest Science 64: 679-690.

Borrega, M., & Kärenlampi, P. P. (2008). Mechanical behavior of heat-treated spruce (Picea abies) wood at constant moisture content and ambient humidity. Holz als Roh-und Werkstoff, 66(1): 63-69.

Bosshard, H. H., & Kučera, L. (1973). Die dreidimensionale Strukturanalyse des Holzes—Erste Mitteilung: Die Vernetzung des Gefäßsystems inFagus sylvatica L. European Journal of Wood and Wood Products, 31(11), 437-445.

Bown, H. E., & Lasserre, J. P. (2015). An air-drying model for piled logs of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* in Chile. New Zealand Journal of Forestry Science, 45(1), 17.

Brodersen, C. R. (2013). Visualizing wood anatomy in three dimensions with high-resolution X-ray micro-tomography (μCT)–a review–. IAWA Journal, 34(4), 408-424.

Caeiro, J. R., Serra, J., González, P., Muñoz, F., & González-Cantalapiedra, A. (2015). Caracterización no destructiva de biomateriales mediante microtomografía computarizada. Biomateriales: Diseño, producción y caracterización, 53-64.

Cheng, L., Rief, S., & Wiegmann, A. (2013). SIMPLE-FFT for flow computations in low porosity μCT images. 5th International Conference on Porous Media & Annual Meeting, Czech Republic, *Memory (GB)*, *51*(60), 11.

Chinga-Carrasco, G., Johnsen, P. O., & Øyaas, K. (2010). Structural quantification of wood fibre surfaces—Morphological effects of pulping and enzymatic treatment. Micron, 41(6), 648-659.

Espinoza, R. H., Olmos, L., & Delgado, I. C. (2016). Study of the dimensional changes of four wood species from commercial plantations during a thermal treatment by dilatometry. Mexican Journal of Materials Science and Engineering.

Esteves, B.M., y Pereira, H.M. (2009).”Wood modification by heat treatment: A review,” Bioresources 4(1): 370-404.

Gacitua E, William, Ballerini A, Aldo, Lasserre, Jean Pierre, & Bahr, David. (2007). Nanoindentaciones y ultraestructura en madera de *Eucalyptus nitens* con micro y meso grietas. Maderas. Ciencia y tecnología, 9(3), 259-270. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2007000300006.

Garibay-García G.A. (2015). Propiedades fisicomecanicas de madera termotratada de *Eucalyptus nitens*. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 134 p.

González, A., Martínez, F., Pernía, A., Alba, F., Castejón, M., Ordieres, J., & Vergara, E. (2006). Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial. *Universidad de la Rioja, Servicio de Publicaciones*.

González-García, M., Almeida, A. C., Hevia, A., Majada, J., & Beadle, C. (2016). Application of a process-based model for predicting the productivity of *Eucalyptus nitens* bioenergy plantations in Spain. Gcb Bioenergy, 8(1), 194-210.

Gunduz, G., Aydemir, D., & Korkut, S. (2010). The effect of heat treatment on some mechanical properties and color changes of uludag fir wood. Drying Technology, 28(2): 249-255.

Harrer, B., & Kastner, J. (2011). X-ray Microtomography: Characterisation of Structures and Defect Analysis. In *Fabrication and Characterization in the Micro-Nano Range* (pp. 119-149). Springer, Berlin, Heidelberg.

Hegde, M., Palanisamy, K., & Yi, J. S. (2013). *Acacia mangium* Willd.-A fast growing tree for tropical plantation. Journal of Forest and Environmental Science, 29(1), 1-14.

Hermoso, P.E.; Mateo, C.R.; Cabrero, R.; J.C. & Fernandez, G.J.I. (2013). Tratamientos térmicos versus propiedades mecánicas en madera de *Pinus radiata*. En: Actas del. VI Congreso Forestal Español.

Hoadley, R. B. (2000). Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology. Taunton press. 280 pp.

Homan, W.J. & Jorissen, A.J.M. (2004). Wood modification developments. Heron, 49(4): 361–386.

INDICA (2009). Simulacion de fluidos utilizando computadores. Boletin técnico de INDICA S.A. No. 77. < www.indica.com >. Consultado el 20 de noviembre 2017. http://www.indisa.com.co/indisaonline/anteriores/Indisa%20On%20line%2077.pdf

Järmsä, S., & Viitaniemi, P. (2001). Heat treatment of wood – Better durability without chemicals. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France. Juanes, D. (2010). 2.2. La tomografía axial computarizada. Estudio de escultura de madera. La Ciencia y el Arte II, 32-43.

Juodeikiené, I. (2013). Influence of Thermal Treatment on the Hygroscopicity and Dimensional Stability of Oak Wood. Materials Science, *19* (1): 51-55.

Kamdem, D. P., Pizzi, A., & Jermannaud, A. (2002). Durability of heat-treated wood. Holz als Roh-und Werkstoff, 60(1): 1-6.

Karlsson, H. (2006). Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry: a Handbook. Lorentzen & Wettre. 120 p.

Kibblewhite, R., P. Johnson, B., I. Shelbourne, C., J. (2000ª). Kraft pulp qualities of *Eucalyptus nitens, E. Globulus,* and *E. Maidenii*, at ages 8 and 11 years. New Zealand Journal of Forestry Science, v. 30 (3): 447-457.

Kollmann, F.F.P., & Côté, W.A. (1968). Principles of Wood Science and Technology. Volume I: Solid Wood. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 592 p.

Korkut, S., & Budakçı, M. (2009). Effect of high-temperature treatment on the mechanical properties of rowan (*Sorbus aucuparia* L.) wood. Drying Technology, 27(11): 1240-1247.

Latief, F. D. E., Fauzi, U., Irayani, Z., & Dougherty, G. (2017). The effect of X-ray micro computed tomography image resolution on flow properties of porous rocks. *Journal of microscopy*, *266*(1), 69-88.

Lausberg, M. J. F., Gilchrist, K. F., & Skipwith, J. H. (1995). Wood properties of *Eucalyptus nitens* grown in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, *25*(2), 147-163.

López, L, L. (2016). Futuro del Eucalipto en juego. La voz de Galicia. < www.lavozdegalicia.es/noticia/economia.htm >. Consultado el 20 de mayo 2017. https://www.lavozdegalicia.es/noticia/economia/.../0003_201602G28P40991.htm

Maire, E., Buffiere, J. Y., Salvo, L., Blandin, J. J., Ludwig, W., & Letang, J. M. (2001). On the application of X-ray microtomography in the field of materials science. Advanced Engineering Materials, 3(8), 539-546.

Mayo, S. C., Chen, F., & Evans, R. (2010). Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. Journal of structural biology, 171(2), 182-188.

Mendoza, M. S., Gómez, M. C., Navarrete, L. O., & Herrera, R. E. (2015). Chemistry characterization of *Eucalyptus nitens*, from 8 years old coming from a commercial plantation. Mexican Journal of Materials Science and Engineering, 2(3), 38-44.

Moliński, Waldemar, Roszyk, Edward, Jabloński, Aleksander, Puszyński, Jakub, & Cegiela, Janusz. (2016). Mechanical parameters of thermally modified ash wood determined by compression in radial direction. Maderas. Ciencia y tecnología, 18(4), 577-586. Epub 00 de de 2016.https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000050

Montagu, K. D., Kearney, D. E., & Smith, R. G. B. (2003). The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production—a review. Forest Ecology and Management, 179(1), 1-13.

Moretón Fernández, Á. (2016). Estudio de la fotoluminiscencia en obleas y células solares de Silicio. Tesis de licenciatura. Universidad de Valladolid. España. 98 p.

Moya, R., Ureña, E., Salas, C., Muñoz, F., & Espinoza, O. (2011). Kiln drying defects presence and grouping of wood from ten tropical species growing in fast-growth plantation. Wood material science and engineering.

Muñoz, F., Espinosa, M., Herrera, M. A., & Cancino, J. (2005). Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. Bosque (Valdivia), 26(1), 93-99. https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002005000100009

Nixon, M. S., & Aguado, A. S. (2012). *Feature extraction & image processing for computer vision*. Academic Press.

Nolan, G. B., Greaves, B. L., Washusen, R., Parsons, M., & Jennings, S. (2005). Eucalypt Plantations for Solid Wood Products in Australia-A Review. Melbourne, Project No.PN04.3002, 130 pp.

Olmos, N.L.R.; Espinoza, H.R.; Cruz-de-León, J. & Hernández, V.A. (2016). Caracterización microestructural 3D de la madera de *Pithecellobium pallens* mediante microtomografía de rayos X. Memorias del XXII Congreso de la SOMIM del 28 al 30 Septiembre. Mérida, Yucatán, México.

Pereira, C. (2004). Tomografía Axial Computada. XIII Seminario de Ingeniería Biomédica.

Piao, CH; Teng-Tong, TL; Teng, T. 2000. Research on the drying of *Acacia mangium* lumber. China Wood Industry. 14(1):16-18.

Prieto Mejia, J. J., Cardona, Y., & Alberto, J. (2017). Secado artificial de la madera juvenil de Acacia (*Acacia mangium*) proveniente del municipio Puerto Gaitán (Meta) (Bachelor's thesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas).

Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (1998). Tratamiento digital de señales. Principios, algoritmos y aplicaciones 3ª ed. Madrid España.

Razali A. K., & Mohd H. S. (1993). Property and Utilization. (Chapter 11). In: *Acacia mangium* - Growing and Utilization. MPTS Monograph Series No. 3. Winrock International and FAO, Bangkok, Thailand, pp 225-241

Rojas, E. G., & Ortiz I. O. (2012). Identificación del cilindro nudoso en imágenes TC de trozas de *Pinus radiata*: Estudio Comparativo. Maderas. Ciencia y tecnología, 14(1), 65-77.

Roque, R. M., Muñoz, F., Garita, C. S., Jiménez, A. B., Zúñiga, L. L., & Segura, E. E. (2010). Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, *7*(18), 1-217.

Rozas, Carlos, Sánchez, Reinaldo, & Pinedo, Paula. (2005). Secado de *Eucalyptus nitens* y *globulus* y su aprovechamiento en blocks, pisos y muebles. Maderas. Ciencia y tecnología, 7(2), 109-120. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2005000200005

Sauvola, J., & Pietikäinen, M. (2000). Adaptive document image binarization. Pattern recognition, 33(2), 225-236.

Sharma, M., Walker, J. C. F., & Chauhan, S. S. (2017). Eliminating Growth-Stresses in Eucalyptus: A Scoping Study with *E. bosistoana* and *E. nitens*. In Wood is Good (pp. 47-54). Springer, Singapore.

Shield, E. (2000). Realidades de Mercado de eucalipto y pino, y lo que estas significan para el sector forestal Uruguayo. Jornadas forestales de Entre Ríos. 26 de octubre, Concordia Entre Ríos, Argentina. < www.agroindustria.gob.ar/new/0-0/forestacion/_.../221%20Shield-español.pdf. >. Consultado el 20 de mayo 2017.

Silva, M. J., & Gibson, L. J. (1997). The effects of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-dimensional cellular solids. *International Journal of Mechanical Sciences*, *39*(5), 549-563.

Simpson, W. (1996). Method to estimate dry-kiln schedules and species groupings: Tropical and temperate hardwoods. Res. Pap. FPL–RP–548. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 57 p.

Steppe, K., Cnudde, V., Girard, C., Lemeur, R., Cnudde, J. P., & Jacobs, P. (2004). Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. Journal of structural biology, 148(1), 11-21.

Syrjänen, T., Kestopuu Oy (2001). Production and classification of heat treated wood in Finland. In: Review on heat treatments of wood, *Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.

Trtik, P., Dual, J., Keunecke, D., Mannes, D., Niemz, P., Stähli, P. & Stampanoni, M. (2007). 3D imaging of microstructure of spruce wood. Journal of structural biology, 159(1), 46-55.

Valenzuela C, Paulina, Bustos A, Cecilia, Lasserre, Jean Pierre, & Gacitúa E, William. (2012) a). Caracterización nanomecánica de la estructura celular y anatómica de *Eucalyptus nitens* y su relación con la frecuencia de grietas y rajaduras en madera redonda. Maderas. Ciencia y tecnología, 14(3), 321-327. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012005000006

Valenzuela C, Paulina, Bustos A, Cecilia, Lasserre, Jean Pierre, & Gacitúa E, William. (2012) b). Fracturas en madera de *Eucalyptus nitens*: efecto de las propiedades mecánicas a nivel ultraestructural y de la anatomía celular. Maderas. Ciencia y tecnología, 14(2), 225-238. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012000200009

Vernois M. (2001). Heat treatment of wood in France. In: Review on heat treatments of wood, Proceedings of the special seminar of COST Action E22, Antibes, France.

Zanuncio, A. J. V., Motta, J. P., da Silveira, T. A., Farias, E. D. S., & Trugilho, P. F. (2013). Physical and colorimetric changes in *Eucalyptus grandis* wood after heat treatment. BioResources, 9(1), 293-302.