# MODELO TÉCNICO PARA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS CON TOMOGRAFÍA DE IMPULSO PARA EL ARBOLADO URBANO DEL DISTRITO CAPITAL

SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE DIRECCIÓN DE CONTROL AMBIENTAL SUBDIRECCIÓN DE SILVICULTURA, FLORA Y FAUNA SILVESTRE BOGOTÁ, NOVIEMBRE DE 2018

## **TABLA DE CONTENIDO**

| 1. PRESENTACIÓN  | 5                    |
|--|----------------------|
| 2. ANTECEDENTES  | 6                    |
| 3. PRINCIPALES CAUSAS DE DAÑOS EN TRONCO Y RAÍCES DEL ARBOLADO URBANO DE<br>BOGOTÁ   | 8                    |
| 4. MÉTODOS DE ANÁLISIS NO DESTRUCTIVOS PARA EVALUACIÓN DE ÁRBOLES URBANOS 4.1 Análisis de árboles con tomografía de impulso Arbotom®                     |                      |
| 4.1.1 Aspectos a considerar para la interpretación de resultados de la tomografía  | .12                  |
| 5. PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN SILVICULTURAL CON TOMOGRAFÍA ACÚSTICA 5.1 Cuándo es necesario realizar una tomografía?                               | . 15<br>. 17         |
| 6. ANALISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS 6.1 Tratamiento de datos: Identificación de valores atípicos (outlier). 6.2 Matriz numérica de datos | 24<br>25<br>27<br>30 |
| 7. ESTUDIOS DE CASO DE ANALISIS CON TOMOGRAFÍA DE IMPULSO PARA EL AREA URBANA DE BOGOTÁ REALIZADOS POR LA SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE               | 34<br>34<br>35<br>37 |
| 8. DETERMINACION DE LAS RECOMENDACIONES DE MANEJO SLVICULTURAL   | .43                  |
| 9. MODELO DE FICHA TÉCNICA DE REGISTRO- EVALUACIÓN TÉCNICA DEL ARBOLADO CON<br>TOMÓGRAFO Y RESISTÓGRAFO  | .44                  |
| 10. CONCLUSIONES   | .47                  |
| 11. BIBLIOGRAFIA   | .49                  |

## LISTADO DE TABLAS

| Tabla 1 Especies, número de muestras y valores de diámetro de los individuos evaluados<br>Tabla 2   Valores mínimos y máximos de velocidad de propagación de onda registrados para |          |
|--|----------|
| especies analizadas  |          |
| Tabla 3 Ficha técnica Acacia melanoxilon   |          |
| Tabla 4 ficha técnica Eucalyptus globulus  |          |
| Tabla 5. Ficha técnica Pinus patula  |          |
| Tabla 6 . Recomendaciones de manejuo con relación a las velocidades de onda  |          |
| Tabla 0 . Necomendaciones de manejdo con relación a las velocidades de onda  | 43       |
| LISTA DE FIGURAS   |          |
| Figura 1Evaluación visual del arbolado por parte del profesional forestal  | 7        |
| Figura 2 Evaluación con equipos especializados (tomógrafo)   |          |
| Figura 3 Árbol de Acacia japonesa (Acacia melanoxilon) con cavidad producida por pudrició  | ón 8     |
| Figura 4 Árbol de Urapán (Fraxinus chinensis) con cavidad producida por pudrición  |          |
| Figura 5 Tomógrafo de impulso Arbotom  |          |
| Figura 6 Sensores posicionados en el árbol para generación del impulso acústico  | 10       |
| Figura 7 Gráfico de líneas (Distancias en cm y tiempo de recorrido de la onda entre los sens   |          |
|  |          |
| Figura 8 Imagen tomográfica de individuo de Acacia japonesa , filtro (Purple-Red-Yellow-Gro  | een)     |
| Figura 9 Eucalipto común- Angiospermas dicotiledóneas  |          |
| Figura 10 Pino candelabro- Gimnospermas  |          |
| Figura 11 Palma washingtoniana-Angiospermas -Monocotiledoneas  |          |
| Figura 12 Plano de corte del tronco de plantas leñosas. Fuente: Chavesta (2006)  |          |
| Figura 13 Diagrama de decisión y procedimiento para tomografía   |          |
| Figura 14 Componentes del tomógrafo de impulso marca Rinntech: Fuente: Secretaria Disti  |          |
| de Ambiente, 2018  |          |
| Figura 15 Tomografía a 1.5 m de la base del suelo  |          |
| Figura 16 Tomografía a nivel basal (0 cm de la base del suelo  |          |
| Figura 17 Posición de los sensores en la tomografía 3D   |          |
| Figura 18 Selección de la forma del tronco en la página inicial del Arbotom  |          |
| Figura 19 Ingreso de datos de los sensores al Arbotom para tomografía 3D   |          |
| Figura 20 Selección del tipo de filtro ( <i>color model</i> ) en la página inicial del Arbotom   |          |
| Figura 21 Emisión de la señal de impulso y recepción por parte de los sensores   |          |
| Figura 22 Tratamiento de datos: Identificación de valores típicos u outlier  |          |
| Figura 23 Ejemplo de matriz numérica de datos generada en la tomografía  |          |
| Figura  24 Imagen tomográfica de individuo de Cupressus lusitánica con daño interno (filtro  |          |
| Purple, Red, Yellow, Green   |          |
| Figura 25 Matriz numérica de velocidad de propagación de onda, individuo Cupressus lusita  |          |
|  |          |
| Figura 26 Imagen tomográfica, individuo de la especie Lafoensia speciosa, indicando los  |          |
| valores mínimos y máximos de velocidad de onda. Filtro Purple-Red-Yellow-Green   | 29       |
| Figura 27 Modelo de sección para tomografía 3D. Fuente: (Rinntech, 2011)   |          |
| Figura 28 Visualización de la tomografía 3D árbol de <i>Pinus radiata, h= 0 m, 87 m, 153 m del</i>   |          |
| del suelo  |          |
| Figura 29 Gráfico de modelación mecánica. Ejemplo: individuo de Cupressus lusitánica   |          |
| Figura 31Imagen tomográfica 2D árbol Acacia  |          |
| Figura 32 Fotografía tocón posterior a la tala   |          |
| Figura 33 Aspecto exterior árbol Eucalipto   |          |
| Figura 34 Detalle gomosis localizada árbol Eucalipto   |          |
| Figura 35 Imagen tomografía 2D individuo Eucalyptus globulus   |          |
| Figura 36 Gráfico de modelación mecánica individuo Eucalyptus Globulus   |          |
| Figura 37 Aspecto exterior árbol de Ciprés   |          |
| . 134. 4 T. 1. 1040000 Ontol 101 41 501 40 Olph 00   | ···· + 1 |

| Figura | 38 Detalle sensores en el árbol        | <b>ļ</b> 1 |
|--------|--|------------|
|        | 39 Gráfico 2D del individuo de Ciprés4 |            |
| Figura | 40 Gráfico de modelación mecánica4     | 11         |

### 1. PRESENTACIÓN

La Secretaría Distrital de Ambiente es la entidad encargada de orientar y liderar la formulación de las políticas ambientales y de aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el suelo a nivel del Distrito Capital de la ciudad de Bogotá. A través de la Subdirección de Silvicultura Flora y Fauna silvestre, la Entidad direcciona las acciones en materia de prevención y control del deterioro ambiental relacionados con los recursos flora, fauna y silvicultura, para este último, la Subdirección tiene dentro de sus funciones adelantar procesos de investigación sobre temas relacionados con el manejo del arbolado urbano, para lo cual se planteó en las metas de investigación del Plan de Desarrollo "Bogotá Mejor para Todos (2016-2020), generar ocho instrumentos técnicos, científicos y de prevención para el mantenimiento en la gestión del arbolado urbano que propendan por su protección y prestación de los servicios ambientales inherentes.

Por lo anteriormente mencionado, el presente modelo técnico, pretende dar alcance y cumplimiento a la formulación de instrumentos que permitan mejorar la gestión del arbolado urbano de la ciudad, la cual se ha venido fortaleciendo desde el año 2010, con la adquisición de equipos de evaluación especializados: dos (2) tomógrafos acústicos y un (1) resistógrafo. La formulación de esta herramienta, complementa el uso adecuado de estos equipos, estableciendo los criterios para su utilización, los procedimientos de uso, el análisis de los datos obtenidos y las recomendaciones de manejo, lo cual contribuirá a la toma de decisiones en materia de evaluación silvicultural propendiendo el manejo y conservación de la cobertura arbórea de la ciudad.

#### 2. ANTECEDENTES

Los árboles en el entorno urbano se constituyen en un elemento fundamental en el paisaje de la ciudad, pues brindan diversos beneficios de orden ambiental, económico, paisajístico y social. El manejo del árbol urbano en la ciudad de Bogotá, ha cobrado especial importancia debido a que es un elemento que está siendo impactado mayormente por el proceso de renovación urbana del Distrito y porque además, es una fuente de alto riesgo debido al preocupante estado físico y sanitario de muchos de sus individuos, causantes de los muchos y frecuentes accidentes por caída de ramas y por el volcamiento total de sus estructuras (Corzo, 2007). En este contexto la planificación de la silvicultura urbana se ha convertido en una herramienta fundamental para la conservación, protección y manejo del arbolado urbano de la ciudad, con el fin de aumentar la prestación de los beneficios ambientales inherentes.

La Secretaría Distrital de Ambiente, es la entidad responsable de realizar la evaluación técnica para el otorgamiento de permisos y autorizaciones para realizar tratamientos silviculturales en el Distrito Capital. Estos permisos se otorgan mediante la evaluación y valoración visual del arbolado por parte del profesional forestal, quien realiza la recomendación del manejo silvicultural más adecuado, insumo para el respectivo concepto técnico. La evaluación y valoración visual de las condiciones físicas y sanitarias del árbol se constituye en el principal criterio técnico empleado por los profesionales forestales para determinar el tratamiento silvicultural más adecuado a realizar en el árbol (Figura1). La evaluación visual evalúa de forma cualitativa las características físicas y sanitarias del árbol, con base en los conocimientos y experiencia de los ingenieros de campo, a partir de la valoración de variables como: altura del árbol, diámetro de fuste, forma de copa, entre otras, así como condiciones físicas y sanitarias, incluidas la inclinación del tronco, las afectaciones de tipo biológico, los defectos asociados al crecimiento y las condiciones de emplazamiento o localización dentro del entorno urbano que afectan las raíces de los árboles y pueden generar su inestabilidad. Con base en la recopilación de esta información se elabora el concepto técnico y se efectúan las recomendaciones de tratamiento silvicultural más adecuado.

En algunos casos mediante la inspección visual no es posible determinar el estado interno del tronco del árbol, pues a simple vista el árbol puede parecer sano, sin embargo, internamente puede presentar daños por descomposición que pueden ocasionar fallas estructurales y desencadenar caída o volcamiento del árbol, con las posibles afectaciones a personas y bienes. En este sentido el uso de tecnologías de evaluación y diagnóstico con equipos especializados como el tomógrafo de impulso se constituye en una herramienta más precisa para determinar el estado interno de los árboles urbanos y fortalecer la toma de decisiones en materia de tratamientos silviculturales (Figura 2).





Figura 1Evaluación visual del arbolado por parte del profesional forestal

Figura 2 Evaluación con equipos especializados (tomógrafo)

Este tipo de tecnología ha sido utilizada en áreas urbanas a nivel mundial para identificar, localizar y cuantificar defectos internos en árboles, por ejemplo, Rabe et al. (2004) empleando el tomógrafo Plcus® demostraron la viabilidad del uso de esta técnica para evaluación de árboles con resultados precisos para cuantificar el tamaño y de forma moderada para identificar la posición del daño por deterioro interno en árboles de Fagus sylvatica. Wang et al. (2007) evaluando árboles de Quercus rubra por medio de tomografía de impulso, encontraron limitaciones para diferenciar cavidades, de pudrición del duramen, por lo que recomiendan realizar complemento con la prueba del resistógrafo. De otro lado, D'Almeida-Pereira et al. (2013) al evaluar estado de conservación de 21 especies de árboles en el Jardín Botánico de la ciudad de Coimbra-Portugal, por medio de tomógrafo Arbotom®, resaltó la importancia de complementar los resultados obtenidos con la tomografía a través de la observación visual, así mismo Averseng (2015), señaló la importancia de la utilización de esta herramienta para medir un defecto previamente detectado por el profesional especialista forestal, con el fin de auxiliar en la toma de decisiones sobre el tratamiento a realizar en el árbol. Recientemente, Ostrovsky et al. (2017) hallaron que la tomografía acústica proporcionó una precisión del 83% en la determinación del área de daño interno del tronco del árbol, lo cual se consideró satisfactoria para la evaluación general de la estabilidad de los árboles incluso en árboles muy dañados en zonas verdes urbanas.

# 3. PRINCIPALES CAUSAS DE DAÑOS EN TRONCO Y RAÍCES DEL ARBOLADO URBANO DE BOGOTÁ

Los árboles urbanos esta sujetos a la influencia de diversos factores bióticos y abióticos, como daños mecánicos, que afectan el vigor y que se manifiestan a través de síntomas en las estructuras que conforman el árbol, entre ellos el mayor impacto procede del ataque de plagas y patógenos (Zaragoza et al. 2015). Una de las principales causas que lleva al volcamiento del árboles debido a vientos y lluvias es la presencia de pudriciones en raíces y tronco (Urcelay et al. 2012).

La pudrición es una de las enfermedades más comunes en los árboles urbanos, ya que debilita las fibras de la madera y puede provocar fracturas y cavidades en los árboles (ISA, 2006) (Figura 3). Esta enfermedad es causada por hongos xilófagos que producen deterioro progresivo de las paredes celulares e interrumpen el flujo de savia y nutrientes y puede afectar a las raíces, troncos y ramas. En los árboles de la capital de acuerdo con los registros de volcamiento de árboles, se ha identificado que la pudrición en tronco y raíces es una de las principales causas de volcamiento de árboles desde la raíz en individuos del género Acacia (Figura 4).



Figura 3 Árbol de Acacia japonesa (Acacia melanoxilon) con cavidad producida por pudrición



Figura 4 Árbol de Urapán (Fraxinus chinensis) con cavidad producida por pudrición

Existen varios tipos de hongos deterioradores de madera, la pudrición blanca, pudrición marrón y pudrición parda. Todos los tipos de pudriciones generan ataque principalmente al duramen, por eso se observan los huecos o cavidades, dejando la albura sosteniendo el árbol y perdiendo su capacidad estructural (Shigo, 1989).

Otro tipo de ataque corresponde a insectos xilófagos, que pueden ser resultado del manejo inadecuado de los árboles urbanos como podas drásticas o mal realizadas, injurias, exposición a vientos fuertes y estrés, lo cual aumenta la susceptibilidad al ataque de estos organismos (Fontes, 1998).

El profesional forestal está capacitado para identificar los signos y síntomas externos del tronco que denoten posibles pudriciones, como cavidades, daños físicos, presencia de humedad excesiva o ataque de insectos, sin embargo, la evaluación visual a veces no es suficiente para identificar defectos estructurales internos en los árboles y de ahí la importancia de la evaluación a través de la tomografía.

## 4. MÉTODOS DE ANÁLISIS NO DESTRUCTIVOS PARA EVALUACIÓN DE ÁRBOLES URBANOS

La aplicación de métodos no destructivos de evaluación de árboles urbanos, permite verificar el estado interno del tronco, manteniendo su integridad y conservando sus características y seguridad estructural *in situ*. Diversas técnicas de diagnóstico rápidas y precisas han surgido recientemente con el fin de detectar la descomposición y otros tipos de defectos estructurales en los árboles (Wang & Allison, 2008). La evaluación no destructiva (NDE), por sus siglas en inglés, es la ciencia que permite identificar las propiedades físicas y mecánicas de una pieza de material sin alterar su capacidad de uso final y luego usar esta información para tomar decisiones con respecto a las aplicaciones apropiadas (Pellerin & Ross, 2002; Pereira, 2007).

Estas técnicas se basan en la aplicación de fenómenos físicos como ondas electromagnéticas, elásticas, acústicas entre otras, lo cual permite estimar, evaluar o detectar una determinada propiedad en el material como la densidad y el módulo de elasticidad, obtener información sobre el estado interno del tronco y permite la determinación de la resistencia de la madera por fuerzas externas (Pereira-Rollo, 2014). El principio de propagación de ondas mecánicas es el método más utilizado para realizar este tipo de evaluaciones con el fin de verificar y analizar el comportamiento la madera y su estado de descomposición interna (Bucur, 2003). Para este fin son utilizados gran variedad de equipos, con métodos de evaluación y análisis que de manera más objetiva permiten obtener resultados aplicados al manejo de la silvicultura urbana.

Equipos con el principio de ondas sónicas son empleados para evaluar el estado interno de árboles, proporcionando una representación gráfica de su estado interno y de esta forma auxiliar en la toma de decisiones acerca de los tratamientos silviculturales más adecuados. Algunos de los métodos utilizados con el principio de propagación de ondas acústicas como Fakopp®, Picus® y Arbotom® han sido recientemente empleados para evaluación de la arborización urbana, siendo un método rápido y no invasivo para evaluación del riesgo potencial del arbolado urbano (Ostrosvky, 2017).

En este sentido, la evaluación y diagnóstico a través de tecnologías rápidas y más precisas como la tomografía de impulso, se convierte en una herramienta que ayuda a cuantificar el tamaño y la dimensión de la afectación interna del tronco, ocasionada por afectaciones fitosanitarias, daños generados por injurias mecánicas, como accidentes de carros, vandalismo, entre otros. Esta evaluación especializada se convierte en un herramienta que permite auxiliar en la toma de decisiones de manejo silvicultural que garanticen la conservación del arbolado urbano.

#### 4.1 Análisis de árboles con tomografía de impulso Arbotom®

El tomógrafo de impulso Arbotom® (Figura 5) fue desarrollado para la evaluación del estado interno de árboles (Rinn, 2011). Este se basa en la medición del tiempo de transmisión de la onda acústica "stress wave timer" o medición lineal de estrés cronometrado. Un impulso es generado y captado por diversos sensores posicionados en el árbol (Figura 6). A partir de las distancias registradas que corresponden a la posición de los sensores en la sección diametral del tronco, se calculan las velocidades de recorrido entre los mismos.





Figura 5 Tomógrafo de impulso Arbotom

Figura 6 Sensores posicionados en el árbol para generación del impulso acústico

Los tiempos registrados entre la señal emitida y recibida de cada uno de los sensores después de recorrer la distancia a través de la madera, son empleados para calcular la velocidad de propagación de la onda mediante la siguiente ecuación (Lin, 2011):

$$V = \frac{d}{t}$$

#### Donde:

V= velocidad de propagación de la onda (m/s)

d = distancia entre los sensores en (m)

t= tiempo de propagación de la onda en (s)

Un gráfico de líneas de velocidades de onda de la sección transversal del árbol es generado (Figura 7) indicando las áreas del tejido posiblemente afectadas por algún tipo de descomposición interna (Rinntech, 2005). Los datos se generan en una matriz numérica con las velocidades obtenidas, así como un gráfico o imagen tomográfica (Figura 8) que representa el estado interno del árbol, mediante un software especializado que genera la interpolación de los datos obtenidos en la malla de difracción, la cual mide la interpolación de la onda a través de varias rutas de propagación generada (Rinntech, 2005).

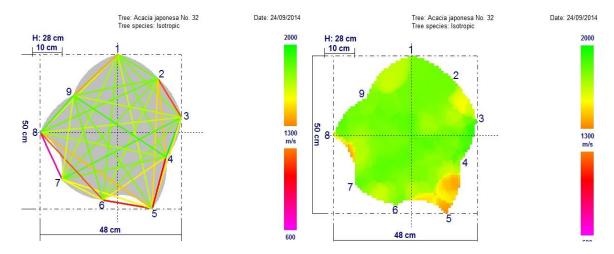


Figura 7 Gráfico de líneas (Distancias en cm y Figura 8 Imagen tomográfica de individuo de Acacia tiempo de recorrido de la onda entre los japonesa, filtro (Purple-Red-Yellow-Green) sensores

La velocidad de impulso a la cual la onda recorre la madera, está directamente relacionada con la densidad del material y el módulo de elasticidad de la madera, siendo utilizada para describir la calidad interna del tronco en esa sección transversal (Pereira-Rollo, 2014). Cuanto más denso es el material, las ondas se transmiten más rápido, caso contrario de la madera con pudriciones o cavidades en que las ondas acústicas se transmiten a una velocidad más lenta, debido a desvíos generados durante el recorrido de la onda (Rinntech, 2005).

La velocidad de propagación de onda será menor, cuanto mayor sea la presencia de defectos. Esto se debe a que se provoca la discontinuidad de la transmisión de la onda, retardando la llegada de la misma al sensor. En el caso de huecos o cavidades, se producirá una reducción en la velocidad de transmisión debido a la desviación que genera la onda al atravesar estos defectos, lo cual aumentará el tiempo de su recorrido y por consiguiente una disminución en la velocidad de propagación (Rinntech, 2005).

El software permite asignar diversos filtros de gama de colores para visualizar el estado interno del tronco en esa sección transversal. El filtro más utilizado para visualizar el estado interno del tronco en la imagen tomográfica Arbotom® es (Red-Yellow-Green) (Figura 8) el cual indica la máxima velocidad de propagación de onda en tono verde y amarillo y menores velocidades de propagación de onda en tonos púrpura y rojo. Esto refleja que las tonalidades de color verde en la sección transversal denotan madera con mayor densidad y buen estado, al contrario de las tonalidades rojo y púrpura que indican madera con posible pudrición o cavidades (Rinntech, 2005)

Existe la posibilidad de realizar la tomografía de una sección transversal del tronco en dos dimensiones (2D) o de varias secciones transversales de manera simultánea, mediante la tomografía 3D o en tres dimensiones, resultando en la visualización de planos transversales y axiales. Para esta última deben utilizarse mínimo 16 sensores (Rinntech, 2005)

#### 4.1.1 Aspectos a considerar para la interpretación de resultados de la tomografía

La interpretación del resultado depende directamente de los rangos de velocidad asignados a cada color, siendo la relación del rango de velocidades dependiente de propiedades mecánicas y la densidad de la madera de cada especie (Ostrovsky et al. 2017). La dirección de propagación de la onda que se utiliza en la tomografía de árboles, corresponde a las direcciones radial y tangencial de la madera en la sección transversal. A diferencia de la dirección axial o longitudinal, no existe una velocidad de referencia como en otros materiales debido a su heterogeneidad, esto genera una variedad de contrastes de velocidades, que son fundamentales para la construcción de la imagen tomográfica e interpretación del estado interno del tronco (Ross & Pellerin, 1994; Lin et al. 2011).

En este sentido debe tenerse en cuenta algunas limitaciones para el análisis de evaluaciones tomográficas, debido a interferencias ocasionadas por la estructura de la madera, lo cual puede generar resultados ambiguos. La tomografía es una herramienta valiosa de análisis, sin embargo, no es posible que responda a todas las preguntas sobre el estado interno del árbol (Calaza & Iglesias, 2016). Debe considerarse la influencia de algunas variables que pueden interferir en la interpretación de los resultados que se describen a continuación.

### Influencia de la anatomía y ortotropía de la madera en la transmisión de ondas acústicas

Los árboles urbanos son considerados plantas superiores de compleja estructura anatómica y fisiológica. Son clasificados en dos principales tipos de plantas: las gimnospermas y angiospermas. Las coníferas son las principales representantes de las gimnospermas, con los géneros más comunes observados en Bogotá (géneros *Pinus y Cupressus*). En las angiospermas dicotiledóneas, se destacan especies como Eucalipto, Cedro, Nogal, Urapán, Acacia entre otros, que constituyen la gran mayoría de árboles en el espacio urbano de Bogotá (Gonzalez & Rojas, 2018) (Figura 9, 10 y 11). Otro grupo importante de árboles que hacen parte del arbolado de la ciudad corresponde a las angiospermas monocotiledóneas o plantas no leñosas (Palmas) con especies características como Palma fénix y Palma de cera, entre otras.



Figura 9 Eucalipto común-Angiospermas dicotiledóneas

Figura 10 Pino candelabro-Gimnospermas

Figura 11 Palma washingtoniana-Angiospermas -Monocotiledoneas

Desde el punto de vista microscópico, la madera, leño o xilema secundario es el resultado del crecimiento en diámetro de los vegetales superiores (Panshin & De Zeeuw, 1980) siendo un tejido complejo, compuesto por un conjunto de células con forma y función diferenciadas, vasos o poros para la conducción de líquidos, células radiales o radios para almacenamiento y transporte en sentido radial y fibras o traqueidas en las coníferas para sustentación del vegetal. Esta variación entre las células que conforman la madera, sumado a las diversas condiciones de crecimiento, hace que existan diferencias entre árboles de la misma especie, así como variación dentro del mismo árbol (Evert, 2013), y esta condición influya el comportamiento de la transmisión de las ondas a través de madera.

La variación en la propagación de las ondas en los tres planos anatómicos (longitudinal, radial y tangencial), se debe a la ortotropía de la madera, pues la propagación ocurre mucho más rápido en la dirección longitudinal o axial que en la dirección perpendicular a las fibras, es decir la dirección transversal (radial y tangencial) (Figura 12). La complejidad en la propagación de las ondas acústicas depende también de otras variables que no dependen del material, como las características de la señal emitida (Arciniegas, 2014).

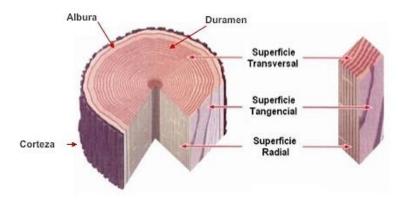


Figura 12 Plano de corte del tronco de plantas leñosas. Fuente: Chavesta (2006)

La propagación de la onda en el sentido transversal (radial y tangencial), empleada en la tomografía acústica del tronco de árboles, es completamente diferente a la transmitida en la dirección longitudinal, pues cuando existen afectaciones en el tejido, el recorrido de la onda en respuesta al tamaño de la afectación sufre una desviación, generando disminución del tiempo de propagación de la misma, esta situación se traduce en información sobre la variación de densidad asociada a los niveles de afectación interna del árbol. De este modo la velocidad no es la real, sino aparente o virtual, sin embargo, a pesar de las limitaciones, es la forma más utilizada de generar imágenes tomográficas para evaluación de evaluación de árboles urbanos (Rinn, 2011).

## Influencia de la humedad y la densidad de la madera

El tipo de planta y su sistema vascular también influyen en el análisis de la tomografía acústica, debido a que el tronco del árbol es el vehículo de transporte de agua y nutrientes. La variación de la humedad en el sentido radial del tronco influye también en la interpretación de la tomografía acústica, pues si existe un alto contenido de humedad este puede reflejarse en la transmisión de ondas acústicas. La humedad de la madera en árboles en pie puede variar de 31 a 249%, siendo más alta en la región del duramen (US Forest, 1987) con disminución en el sentido medula-corteza (Oliveira, 2005).

De acuerdo con Bucur (2003) la velocidad de propagación de ondas mecánicas tiende a aumentar con la disminución de la humedad, siendo más intenso abajo del Punto de Saturación de las Fibras (PSF=±28%), de esta forma se espera que se presenten mayores velocidades de onda en especies de maderas de mayor densidad y menor contenido de humedad. La densidad de la madera en la mayoría de los casos aumenta en la dirección radial medula-corteza, teniendo un comportamiento inversamente proporcional al de la humedad. En el caso de las palmas, por ejemplo, debido a la conformación microscópica de los tejidos de tipo hueco y el alto contenido de humedad, influye en la transmisión de la onda, lo que puede indicar posibles afectaciones internas por las bajas velocidades de onda transmitidas, sin embargo, el individuo puede encontrarse en buen estado.

Por lo tanto, el comportamiento de la humedad como de la densidad de la madera aportan diversas interpretaciones a la tomografía acústica, de esta forma el análisis de la imagen tomográfica se constituye en un proceso complejo que lleva en consideración la interferencia de diversas variables.

# 5. PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN SILVICULTURAL CON TOMOGRAFÍA ACÚSTICA

Para la evaluación del arbolado urbano, es necesario además de la inspección visual apoyarse en herramientas que contribuyen a la toma de decisiones. Dentro de dichas herramientas se encuentra la tomografía. A continuación se relacionan los pasos para toma de decisión, evaluación, captura de datos y análisis de la información obtenida con el tomógrafo acústico Arbotom® que fue la marca comercial de tomógrafo adquirido por la entidad.

### 5.1 Cuándo es necesario realizar una tomografía?

La tomografía se debe realizar principalmente a árboles maduros de gran porte, es decir mayores a 15 metros de altura (Calaza & Iglesias, 2016, a aquellos cuya evaluación silvicultural no sea concluyente y pueda presentar conflicto con la comunidad y en los que la condición externa permita identificar que existen indicios de procesos de descomposición o daños internos que sean difíciles de identificar a simple vista. La evaluación con tomografía se constituye en una herramienta que permite fortalecer la evaluación visual y contribuir con criterios técnicos más precisos para la toma de decisiones en materia silvicultural. Una vez el profesional técnico designado para realizar la evaluación visual del árbol, efectúa la visita durante la cual se identifican las condiciones sanitarias externas que pueden generar indicios de posibles fallas internas en el fuste del árbol, se determinará la necesidad de implementar la prueba del tomógrafo, posterior a este paso se programará la evaluación en campo con tomógrafo. En la figura 13 se presenta un diagrama de decisión para determinar cuándo se debe realizar una tomografía.

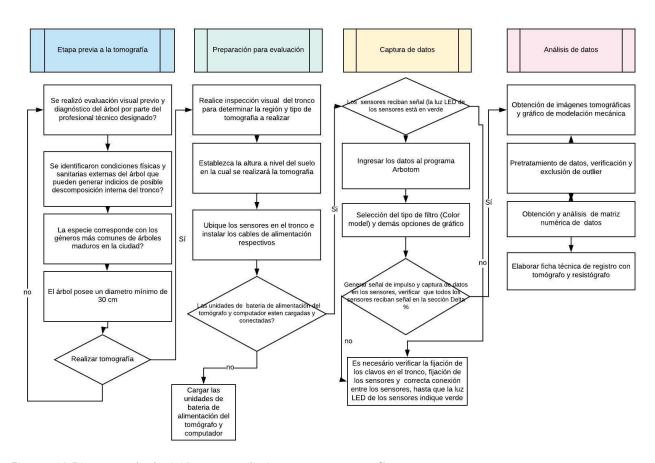


Figura 13 Diagrama de decisión y procedimiento para tomografía

### 5.2 Componentes del Arbotom®

El principal componente del tomógrafo de impulso lo constituyen los sensores, pues son el cerebro del sistema (Rinn, 2011). El mantenimiento del equipo y cuidado en el uso, son fundamentales para mantener la integridad del equipo. En la figura 14 se muestran los demás componentes del equipo marca RINNTECH®.



Figura 14 Componentes del tomógrafo de impulso marca Rinntech: Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente, 2018

#### 5.3 Protocolo para uso tomógrafo acústico ARBOTOM®

Para el uso del tomógrafo Arbotom, se recomienda implementar el siguiente protocolo, el cual permitirá realizar la prueba con la mayor precisión posible.

PASO 1. REALIZAR LA INSPECCIÓN VISUAL: La inspección visual busca identificar anomalías y evidencias en el tronco, como estructuras fúngicas, evidencia de actividad de insectos, daños físicos, cavidades, grietas, y estado general del árbol (inclinación, ramas secas, estado de copa etc.) que son útiles para colocación de los sensores e interpretación de la imagen tomográfica.

PASO 2. ESTABLECER LA ALTURA DEL TRONCO A NIVEL DEL SUELO EN LA CUAL SE REALIZARÁ LA TOMOGRAFÍA: La altura para realizar la tomografía dependerá de la sección en la cual se presenten indicios de pudrición o alguna afectación del tejido (Figura 15 y 16). No existen reglas generales, pues cada situación es diferente y requiere de la evaluación realizada en el paso 1. Luego de determinar la altura, se registrará la medición de la circunferencia del tronco perpendicular al eje central del tronco, esto con el fin de definir cuantos sensores serán colocados, lo cual depende de la dimensión del árbol, para que estos queden más o menos equidistant

#### PASO 3. UBICAR LOS SENSORES EN EL TRONCO

### Para tomografía 2D

- INSTALAR EL PRIMER CLAVO CON AYUDA DE LA BRÚJULA EN EL PUNTO NORTE DEL TRONCO DEL ÁRBOL. En este punto será determinada la posición del sensor número 1.
- DETERMINAR LA DISTANCIA ENTRE LOS CLAVOS, dividiendo el perímetro del árbol entre el número de sensores a colocar. El número de sensores es fundamental para la resolución y exactitud de la imagen tomográfica. Para los árboles de diámetros menores se requerirá de menos sensores que los árboles de diámetros más elevados, y dependerá de la forma del tronco, sin embargo, se recomienda emplear un número mínimo de 10 sensores para árboles de 30 cm a 60 cm de diámetro. Para árboles con diámetros superiores a 60 cm de diámetro debe emplearse de 12 a 18 sensores, esto dependerá de la evaluación de cada situación. Se debe revisar que los clavos penetren la corteza y se fijen bien a la madera del tronco del árbol, sin quedar superficiales o mal anclados.







Figura 15 Tomografía a 1.5 m de la base Figura 16 Tomografía a nivel basal (0 cm de la base del suelo

#### Para tomografía 3D

Para realizar una tomografía en tres dimensiones, se procede a ubicar la serie de sensores de la sección inicial (tomografía 2D), luego se continúa con la instalación de la segunda sección a diferente altura del nivel del suelo, conectando un cable del último sensor de la primera sección en el puerto de salida, con el puerto de entrada del primer sensor de la segunda sección (Figura 17)



Figura 17 Posición de los sensores en la tomografía 3D

PASO 4. UBICAR LOS CLAVOS EN LÍNEA RECTA (perpendicular al eje central del tronco) con la distancia entre ellos determinada en el punto 2, en sentido de las manecillas del reloj y fijar los sensores a los clavos, verificando que estén bien anclados y la cabeza del sensor bien ajustada. Se debe evitar colocar los sensores directamente en la madera con señales de pudrición, cavidades o defectos, pues se afecta la exactitud de la medición. En el caso de ser posicionados en el área basal, estos deben colocarse en los puntos de carga de la estructura del árbol, por ejemplo, en la transición tronco-raíz.

PASO 5. INSTALAR LOS CABLES ENTRE LOS SENSORES: Se deben instalar los cables USB entre los sensores y el cable de alimentación desde la batería de alimentación al primer sensor (posición norte). Al encender la batería de alimentación, la luz LED de los sensores a excepción del último (en amarillo) debe tener la señal en color verde, para indicar que es posible iniciar la evaluación. En el caso que los sensores exhiban color azul o rojo, esto indica que no están generando o recibiendo señal, por lo tanto es necesario revisar el ajuste de los sensores, los clavos o los cables de conexión.

PASO 6. REALIZAR LA MEDICIÓN: Encender el computador en el programa Arbotom y conectar el cable de alimentación desde la unidad de batería de alimentación al computador o tablet, con el fin de iniciar la generación del impulso, transmisión de datos y captura de la información. **Importante**: En *measurement* Conectar el puerto COM (Reconnect COM port) y que se encuentre abierto (opened) para la generación de la señal.

# PASO 7. REALIZACION DE LA TOMOGRAFÍA: INGRESO DE DATOS AL PROGRAMA ARBOTOM®.

Antes de utilizar el tomógrafo, verifique que la unidad de batería de alimentación se encuentre totalmente cargada, así como la batería del computador o tablet.

#### Para la tomografía 2D

- ✓ Definir en la página inicial del software (positions) los siguientes parámetros, localización del proyecto, nombre del árbol y tipo de especie. Para iniciar el análisis es importante seleccionar en el programa el tipo de especie arbórea, el programa contiene algunas especies de climas templados, sin embargo, puede colocarse al menos si es conífera, isotrópica o de porosidad en anillo, esto puede generar cambios en el gráfico, debido a la variación en las propiedades anatómicas de la madera de las diferentes especies.
- ✓ Colocar la altura a nivel del suelo en la que se realizó la evaluación (Height cm).
- ✓ En la sección *options* es posible modificar el número de sensores y valores mínimos y máximos de referencia.
- ✓ Ingresar los datos de la distancia puntual en la que se colocaron los sensores (*Pos cm*), junto con el número total de sensores utilizados. Es importante resaltar que el dato de la primera fila corresponde al perímetro total (cm) del árbol y enseguida la posición puntual en (cm) del primer sensor, segundo sensor y así sucesivamente en el sentido de las manecillas del reloj.
- ✓ Determinar el diferencial de forma del tronco a evaluar, considerando que la mayoría de los troncos de los árboles no presentan un cilindro perfecto (*Radius diff*). Este procedimiento se realizará para cada sensor, estableciendo la diferencia (positiva o negativa) en sentido radial. Ejemplo: En la figura 18, el radio en el sensor 7 (flecha) posee una disminución o entrada en el radio de (-20). La forma del contorno del árbol se constituye en una variable importante para la evaluación, pues influye directamente en el cálculo de la velocidad de propagación de la onda.

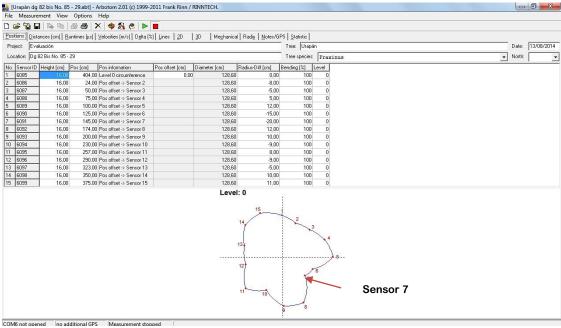


Figura 18 Selección de la forma del tronco en la página inicial del Arbotom

## Para la tomografía 3D

En el programa se ingresan los datos de ubicación de la totalidad de sensores (*positions*), teniendo precaución de referenciar las posiciones de los sensores de manera independiente para cada sección; así mismo se ingresan los datos de altura (*height*), estos se escriben únicamente en el primer sensor de cada sección, por ejemplo, si la primera sección es de 8 sensores se escribe en el sensor 1 la altura a la que se ubica esa sección (Figura 19). A partir del sensor 9 se coloca el perímetro correspondiente a la segunda sección en el segundo nivel y así sucesivamente.

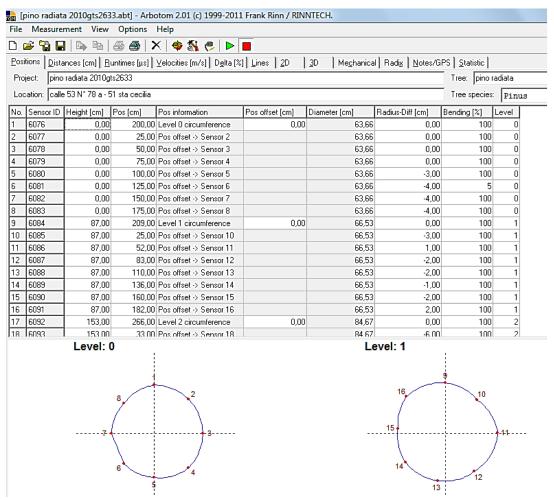


Figura 19 Ingreso de datos de los sensores al Arbotom para tomografía 3D

PASO 8. SELECCIONAR EL TIPO DE FILTRO DE COLOR PARA LA IMAGEN TOMOGRÁFICA. El programa cuenta con varios tipos de filtro de color, es decir la gama de colores asignados a los rangos de velocidad de propagación de onda. El filtro recomendado es Purple-Red-Yellow-Green, que en orden ascendente indica menor velocidad de onda (color rojo a púrpura) para tejido de baja de densidad, con posibles pudriciones o cavidades y color verde a amarillo (mayores velocidades de onda) para tejido en buen estado con densidad media a alta. En la sección 2Doptions- graph - Color model (Figura 20) es posible seleccionar el tipo de filtro. Los filtros de color disponibles en el programa son:

- Red- Yellow
- Red- Yelow-green
- Grayscale
- Rainbow
- Purple-Red-Yellow –Green
- Purple-Cyan

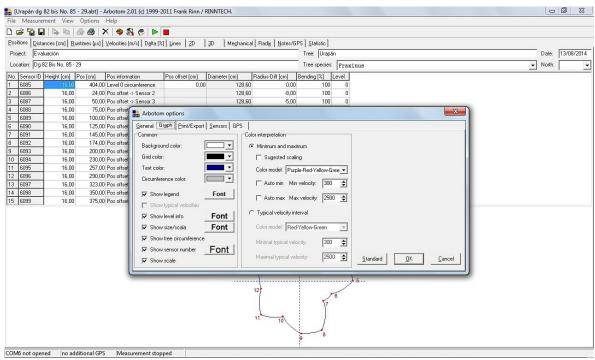


Figura 20 Selección del tipo de filtro (color model) en la página inicial del Arbotom

PASO 9. INICIO DE LA MEDICIÓN. En measurement, activar para dar inicio a la emisión de la señal, debe darse un golpe con el martillo en la parte posterior de los sensores, esto con el fin de que se identifiquen los mismos en el programa, en este punto debe colocarse el programa en la sección Delta %, la cual lleva el registro de la variación o desviación estándar aceptable para realizar la tomografía. Este procedimiento es necesario para controlar estadísticamente la variación entre las repeticiones del tiempo del recorrido de la señal y que las mediciones sean confiables, lo ideal es que no sobrepase el 10%, lo cual es recomendado por el fabricante. Para esto se deben realizar los golpes con el martillo para generación de la señal que sean necesarios para eliminar sesgos y disminuir el delta (Figura 21).

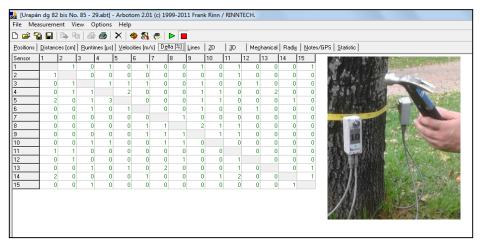


Figura 21 Emisión de la señal de impulso y recepción por parte de los sensores

Es necesario verificar que todos los sensores emitan y reciban señal y que ninguno de los campos de la matriz Delta % esté ausente de medición, pues esto refleja la exactitud en la generación y captura de los datos entre todos los sensores para reconstruir la imagen tomográfica, con el fin de evitar errores y malas interpretaciones de la imagen y los datos. En el caso de la tomografía en 3D se aplican impulsos a todos los sensores instalados en las dos secciones.

#### 6. ANALISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Posterior a la obtención de la imagen tomográfica y respectiva matriz numérica de datos, es posible organizar, analizar e interpretar los resultados con el fin de analizar el estado interno del árbol. Dicho análisis se debe realizar de la siguiente manera:

#### 6.1 Tratamiento de datos: Identificación de valores atípicos *(outlier)*

Es necesario en primera medida determinar si existen valores atípicos u *outlier*, que corresponden a valores extremamente bajos o elevadamente altos, esto con el fin de disminuir la variación en el conjunto de datos que resulten en alteración del resultado final y divergencias en la interpretación. Estos valores pueden encontrarse en el cuadro del módulo *Statistic*, en el cual se observan gráficamente los valores absolutos que difieren demasiado del conjunto de datos, de este modo es posible identificarlos y excluirlos en el rango de velocidades, ajustando los valores de velocidad de onda máximos y mínimos registrados, con el fin de hacer más preciso el análisis e interpretación.

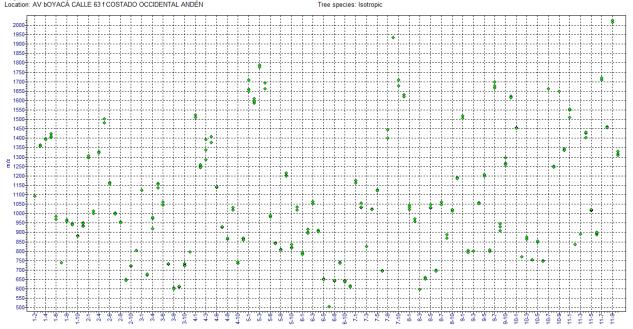
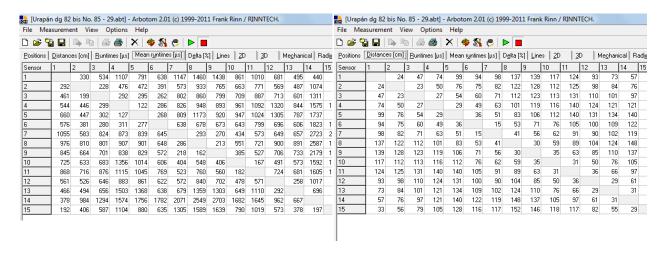


Figura 22 Tratamiento de datos: Identificación de valores típicos u outlier

En la figura 22, es posible observar datos elevadamente altos correspondientes a los puntos de velocidad 1950 a 2000 m/s, así como los puntos muy bajos correspondientes a la velocidad de 500 m/s, estos datos se pueden excluir y establecer las velocidades mínima a partir de 600 m/s y máxima de 1800 m/s, con el fin de hacer más precisa la interpretación.

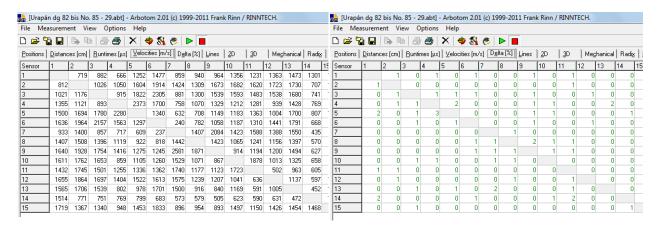
#### 6.2 Matriz numérica de datos

La matriz numérica de datos resulta del cálculo de las variables de entrada (tiempo y distancia) dando como resultado la velocidad de onda en metros por segundo (m/s) como un dato absoluto entre los sensores (Figura 23a, 23b, 23c). También en la matriz numérica de datos, se indica el coeficiente de variación (Delta%) (Figura 23d). Las distancias en centímetros (cm) (distances cm) en este caso son las calculadas por el software entre los sensores y el tiempo (runtimes en microsegundos -µs), es el tiempo recorrido por la onda emitida a partir de cada uno de los sensores y su correspondiente velocidad de llegada. A partir de los datos es calculada la velocidad de onda entre los sensores (Velocities) en m/s. como la relación entre la distancia y el tiempo.



#### a) Tiempos promedio (Mean runtimes)

#### b) Distancias (Distances)



c) Velocidad (Velocities)

d) Coeficiente de variación (Delta %)

Figura 23 Ejemplo de matriz numérica de datos generada en la tomografía

## 6.3 Análisis de datos de tomografía-gráfico de superficie 2D

La imagen tomográfica generada representa los valores de velocidad de propagación de onda en m/s de forma gráfica, mediante la visualización en la escala de colores asignada según el tipo de filtro seleccionado. De acuerdo a la variación de densidad de la madera en esa sección transversal, es posible visualizar y localizar los defectos internos del tronco del árbol. Se debe observar la amplitud de los valores de velocidad (mínima y máxima) y realizar el tratamiento de los datos (exclusión de outlier). En el ejemplo de la figura 24, es posible observar un defecto en la región central de la sección transversal, este se puede identificar por la disminución de la velocidad de onda y consecuente cambio de coloración en la paleta de colores de la imagen tomográfica.

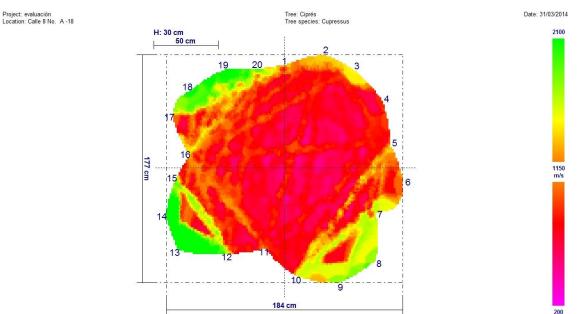


Figura 24 Imagen tomográfica de individuo de Cupressus lusitánica con daño interno (filtro Purple, Red, Yellow, Green

Se observa en la figura 25, la matriz numérica de velocidades de onda para el mismo individuo de *Cupressus lusitánica*, en la cual la velocidad mínima correspondió a 166 m/s y la velocidad máxima 2801 m/s. En este caso es posible establecer que existe una región que en su mayoría presenta madera de baja y media densidad (con velocidades a partir de 166 m/s y áreas en color rojo y púrpura), si se compara con el tejido intacto y de alta densidad (en color verde a amarillo) y velocidades correspondientes de 1150m/s a 2801 m/s. Las áreas correspondientes a las velocidades más bajas probablemente pertenecen a tejido con pudrición o cavidad, por lo cual la recomendación en este caso es la tala del árbol, pues sumado a sus condiciones de emplazamiento y pérdida de resistencia mecánica puede ser susceptible de volcamiento o caída debido a su condición interna.

```
Velocities [m/s]:
                             3
                                                                             12
                                                                                   13
                                                                                              15
                                                                   10
                                                                        11
                          586 494
                                    521
                                            553
                                                 442
                                                      383
                                                            469
                                                                  615
                                                                       627
                                                                            650
                                                                                  543
                                                                                       436
                                                                                            454
                                                                                                  904 1242 1117
           2 924
                         1017 1046
                                     711
                                            588
                                                 347
                                                      445
                                                            518
                                                                            675
                                                                                  594
                                                                                       446
                                                                                                                        419
                                                                 749
                                                                       681
                                                                                             576
                                                                                                  891
                                                                                                       950
                                                                                                             897
                                                                                                                   655
           3
              999 1005
                               1071
                                     428
                                            492
                                                 375
                                                      302
                                                            538
                                                                 457
                                                                       407
                                                                            358
                                                                                  429
                                                                                       196
                                                                                             408
                                                                                                  883
                                                                                                       698
                                                                                                             590
                                                                                                                  539
                                                                                                                        446
                                            817
              445 1022
                        1114
                                     910
                                                 551
                                                       340
                                                            700
                                                                 774
                                                                       416
                                                                            288
                                                                                  451
                                                                                       367
                                                                                             361
                                                                                                  516
                                                                                                        491
                                                                                                             416
                                                                                                                   535
                                                                                                                        379
              527
                    726
                          435
                                915
                                            971
                                                 463
                                                       613
                                                            927
                                                                 830
                                                                       514
                                                                            468
                                                                                  587
                                                                                       308
                                                                                             389
                                                                                                  874
                                                                                                        511
                                                                                                             434
                                                                                                                   604
                                                                                                                        539
                                    981
                                                                                                  547
           6
              576
                          508
                                843
                                                  906
                                                      861 1111 1171
                                                                       489
                                                                            432
                                                                                  395
                                                                                       260
                                                                                             270
                                                                                                             286
                                                                                                                   399
                                                                                                                        404
                    602
                                                                                                       532
           7
              554
                    626
                          535
                                582 1027
                                          1095
                                                      1062 1310 1205
                                                                       668
                                                                            408
                                                                                  340
                                                                                       313
                                                                                             266
                                                                                                  301
                                                                                                       465
                                                                                                             341
                                                                                                                   367
                                                                                                                        362
           8
              463
                    449
                          293
                                635
                                     628
                                            883
                                                 936
                                                           1535 1079
                                                                       592
                                                                            350
                                                                                  477
                                                                                       596
                                                                                             253
                                                                                                  435
                                                                                                       333
                                                                                                             354
                                                                                                                   423
                                                                                                                        404
              526
                    544
                          528
                                693
                                     918
                                           1121 1145 1571
                                                                       358
                                                                            308
                                                                                  295
                                                                                       334
                                                                                             355
                                                                                                             388
                                                                                                                   482
                                                                                                                        378
                                                                  426
          10
              727
                    786
                                805 1231
                                           1255 1109 1138
                                                            611
                                                                                  474
                                                                                       492
                                                                                             493
                                                                                                  743
                                                                                                        700
                          568
                                                                       636
                                                                            346
                                                                                                             406
                                                                                                                   713
                                                                                                                        464
          11
              686
                    957
                          582
                                567
                                     777
                                            494
                                                 651
                                                      628
                                                            506
                                                                694
                                                                            344
                                                                                  799
                                                                                       539
                                                                                             492
                                                                                                  989
                                                                                                       875
                                                                                                             596
                                                                                                                   665
                                                                                                                        656
              670
                                286
                                     473
                                            425
                                                 263
                                                      342
                                                            308
                                                                336
                                                                      323
                                                                                 1544 1551 1333
          12
                    685
                          361
                                                                                                  888
                                                                                                       797
                                                                                                             622
                                                                                                                   664
                                                                                                                        656
          13
              469
                    697
                          441
                                410
                                     344
                                            170
                                                 313
                                                       579
                                                            250
                                                                 458
                                                                       539 1526
                                                                                      1950 1634
                                                                                                  899
                                                                                                        612
                                                                                                             438
                                                                                                                   607
                                                                       540 1810 2801
                                                                                                                        606
          14
              494
                    652
                          166
                                443
                                     446
                                            261
                                                 315
                                                      574
                                                            512
                                                                 498
                                                                                            1265
                                                                                                  710
                                                                                                       470
                                                                                                             483
                                                                                                                  574
          15
              578
                    606
                          411
                                367
                                     521
                                            372
                                                 264
                                                      468
                                                            422
                                                                 482
                                                                       483 1466 1780 1152
                                                                                                  419
                                                                                                       468
                                                                                                             408
                                                                                                                   516
                                                                                                                        569
              839
                                607
                                     445
                                            392
                                                 263
                                                       484
                                                            454
                                                                  479
                                                                                       453
          16
                    857
                          625
                                                                       619
                                                                            622
                                                                                  889
                                                                                             359
                                                                                                       1292
                                                                                                             646
                                                                                                                  625
                                                                                                                        922
          17 1286
                          673
                                493
                                     438
                                            425
                                                 449
                                                      334
                                                            482
                                                                  408
                                                                       670
                                                                            798
                                                                                  773
                                                                                       440
                                                                                            361 1270
                                                                                                             957
                                                                                                                 1247
          18 1259
                    889
                          612
                                549
                                     444
                                            381
                                                 335
                                                      397
                                                            475
                                                                 459
                                                                       341
                                                                            630
                                                                                  588
                                                                                       481
                                                                                             418 999 1111
                                                                                                                  1884 1719
          19
              838
                    737
                          538
                                543
                                     608
                                            393
                                                 356
                                                      415
                                                            488
                                                                 447
                                                                       646
                                                                            866
                                                                                  865
                                                                                       556
                                                                                             510 1090 1389 1757
                                                            475
                                                                 554
                                                                                  893
                                                                                       592
                                                                                             563 1149 1500 1594 1109
                    570
                          465
                                391
                                     554
                                            400
                                                 358
                                                      402
                                                                       619
                                                                            857
```

Figura 25 Matriz numérica de velocidad de propagación de onda, individuo Cupressus lusitanica

Para verificar el tamaño y la extensión de la afectación o si existe una posible compartimentalización (cicatrización del tejido aledaño a una posible pudrición) o en su defecto, si el tejido afectado sigue avanzando, es recomendable complementar la evaluación con un análisis de con el resistógrafo en la sección entre los sensores afectados, con el fin de determinar las variaciones de resistencia de la madera.

NOTA: Es importante tener en cuenta que un gráfico puede mostrar los colores representativos de una posible pudrición (rojo) pero presenta altas velocidades, como en el caso del individuo de la especie Guayacán (Figura 26). Al ajustar las velocidades mínima y máxima, se encontraron valores desde 1855 m/s a 3581m/s, que corresponden velocidades altas, lo cual denota a tejido sano de alta densidad. Por lo tanto, es necesario establecer de forma manual los valores mínimos y máximos de acuerdo a los datos observados y asignar el filtro de color más adecuado, con el fin de evitar interpretaciones erróneas.

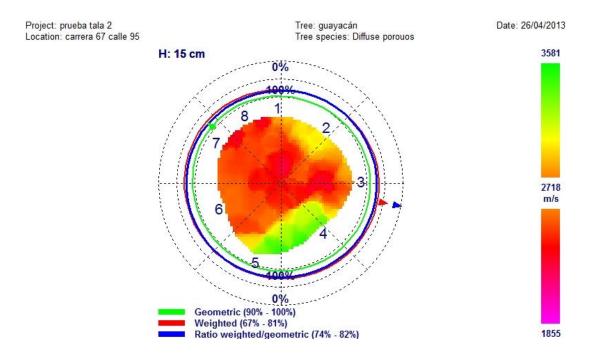


Figura 26 Imagen tomográfica, individuo de la especie Lafoensia speciosa, indicando los valores mínimos y máximos de velocidad de onda. Filtro Purple-Red-Yellow-Green

Así mismo es fundamental para la interpretación de resultados considerar la especie, pues el análisis varía en función de los parámetros anatómicos y densidad (Pereira-Rollo et al. 2014) El análisis del entorno y conocimiento del comportamiento de las especies del arbolado de la ciudad, así como la capacidad de análisis del profesional forestal permitirán determinar la recomendación más adecuada de tratamiento a realizar en el árbol con apoyo de la tomografía.

### 6.4 Análisis de la tomografía- gráfico 3D

Cuando se realizan tomografías en diferentes secciones del tronco a partir del nivel basal, es posible evaluar la extensión de la afectación en el sentido longitudinal del árbol, mediante la visualización de las diferentes secciones axiales (longitudinales) y horizontales (sección transversal del tronco). El gráfico 3D proporciona dos secciones independientes y tres secciones axiales del tronco del árbol, de acuerdo con el modelo de la figura 27.

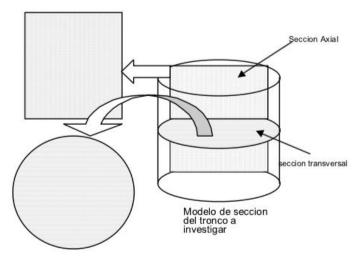


Figura 27 Modelo de sección para tomografía 3D. Fuente: (Rinntech, 2011)

En la figura 28, se observan los elementos del gráfico 3D del individuo de la especie *Pinus radiata*, en la parte central, las tres secciones transversales representan la parte superior, intermedia e inferior de la sección transversal del tronco analizado. Las dos secciones axiales (izquierda y derecha) representan un corte a lo largo de la dirección longitudinal del tronco y generalmente son perpendiculares entre sí.

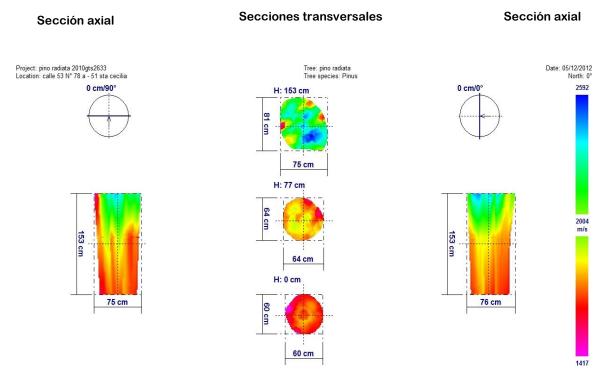


Figura 28 Visualización de la tomografía 3D árbol de Pinus radiata, h= 0 m, 87 m, 153 m del nivel del suelo

Se puede observar que en la sección transversal de este individuo, se encuentra un área de tejido de menor densidad en la parte basal, representado por velocidades de onda entre 1500 m/s y 200 m/s, con aumento de la densidad en dirección a la copa. Es importante resaltar, que a pesar de presentar color rojo en la imagen tomográfica a H= 0 cm (como se explicó en la figura 26), las velocidades mínima y máxima de la matriz numérica de datos correspondieron a 962 y 2927 m/s respectivamente, lo cual denota un tejido en buen estado sin indicios de pudrición.

#### 6.5 Gráfico de modelación mecánica

La estabilidad de los árboles y especialmente su fuerza, no solo es afectada por la calidad de la madera, sino también por su forma geométrica. En comparación con una forma circular de corte transversal, una de sección elíptica puede soportar cargas diferentes, dependiendo de la dirección de la fuerza (Rinn, 2011). En ingeniería civil este efecto es conocido como el "momento de la resistencia" y varía dependiendo de la forma del tronco y la dirección de la carga, siendo que cuanto más circular o cilíndrica la forma del tronco ofrece mayor resistencia. El momento de resistencia se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma = M/W$$

donde  $\sigma$  = momento de resistencia

M= forma del tronco

W= Dirección del viento

El gráfico mecánico del Arbotom®, se basa en este concepto. Permite la evaluación y la representación visual del momento relativo de la resistencia de los arboles con cualquier geometría de la sección transversal (Rinn, 2011). Las áreas dañadas se tienen en cuenta, así como la influencia por cargas de viento y la resistencia a la compresión de la madera (la resistencia a la compresión es la mitad de la fuerza de tensión de la madera promedio. El programa Arbotom® presenta el momento de la resistencia como un gráfico en todas las direcciones del viento, el valor a 0° corresponde al viento desde la dirección opuesta.

- En la figura 29, de acuerdo con la modelación mecánica se puede determinar en el ejemplo del árbol de la especie *Cupressus lusitánica*, que este presenta una pérdida de resistencia mecánica aproximada del 12% en sentido Suroccidente- Nororiente (considerando la posición del sensor 1 en el norte geográfico) posiblemente asociada a la disminución de la resistencia del tejido en el costado opuesto. Las líneas la figura 29 indican: Momento geométrico: Línea verde: No considera los daños internos
- Momento Ponderado: Línea roja: Considera los daños internos del tronco
- Momento de resistencia residual: Línea azul: Considera la resistencia residual a las cargas del viento

El momento de la resistencia residual Ww/Wg se considera una medida de la resistencia de flexión del tronco, por ejemplo, una reducción de los valores de la la resistencia residual de 50% significa que el árbol ha perdido el 50% de la capacidad para resistir cargas de vientos (Rinn, 2011).

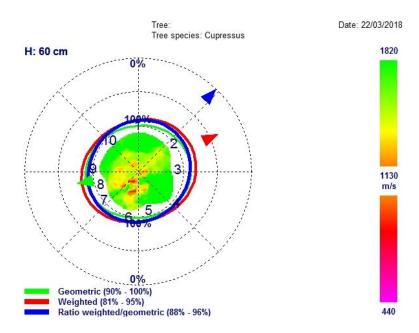


Figura 29 Gráfico de modelación mecánica. Ejemplo: individuo de Cupressus lusitánica

# 7. ESTUDIOS DE CASO DE ANALISIS CON TOMOGRAFÍA DE IMPULSO PARA EL AREA URBANA DE BOGOTÁ REALIZADOS POR LA SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE

#### 7.1 ALCANCE Y METODOLOGIA

La secretaría Distrital de Ambiente, ha realizado desde el año 2010 al año 2018, un total de 574 evaluaciones con tomografía de impulso de las principales especies de la ciudad. Para realizar el análisis de datos del presente estudio se seleccionaron 5 géneros representativos del arbolado antiguo, de acuerdo con las especies con mayor frecuencia de volcamiento en la ciudad en los últimos años y las más solicitadas para tratamientos silviculturales. Mediante este análisis de datos se determinaron los valores de referencia para las especies más representativas, para contribuir con la generación de información técnica y científica relacionada con el estado interno de los árboles del Distrito Capital.

#### 7.2 ANALISIS ESTADÍSTICO

En primer lugar, se realizó un análisis preliminar de los datos, seleccionando 6 especies principales, Eucalipto común (*Eucalyptus globulus*), Eucalipto plateado (*Eucalyptus cinerea*), Urapán (*Fraxinus chinensis*) Ciprés (*Cupressus lusitánica*), Acacia (*Acacia* spp) y Pino (*Pinus patula*), agrupando en diversas clases de diámetro los individuos evaluados, así como el número de sensores. Se realizó análisis estadístico descriptivo para establecer los valores de velocidad de propagación de onda mínimos y máximos, con el fin de establecer categorías y valores de referencia para las especies de estudio. Los datos fueron comparados por medio de análisis de varianza para verificar las diferencias o semejanzas estadísticas dentro del conjunto de datos. Los individuos arbóreos se categorizaron en tres clases de diámetro y se estableció la frecuencia de árboles por clase de diámetro. También se evaluaron visualmente cada una de las imágenes tomográficas para las especies del estudio, así como la matriz numérica correspondiente a las velocidades de propagación de onda de cada una, lo cual permitió clasificar de acuerdo con el resultado el tipo de tejido en esa sección transversal en tres principales tipos:

Bueno: Velocidades de propagación de onda comprendidas entre 1000 a 1500

Regular: Velocidades de propagación de onda de 300 m/s a 1000 m/s que

Malo: Velocidades de propagación de onda menores de 300 m/s

#### 7.3 RESULTADOS

Las especies con el mayor número de evaluaciones tomográficas correspondieron a *Eucalyptus globulus*, *Cupressus lusitánica y Fraxinus chinensis*, dado que estas especies son las más representativas del arbolado antiguo (Gonzalez & Rojas, 2018) y debido a su gran porte generan dudas en relación el estado interno y estabilidad del tronco (Tabla 1). Estas especies también presentaron los valores más altos de diámetro, siendo el Eucalipto común la especie que presenta la mayor frecuencia de árboles mayores a 90 cm de diámetro.

La especie *Fraxinus chinensis* presentó la mayor frecuencia de árboles evaluados de diámetros de 30 a 60 cm, considerando que ha sido una de las especies más plantadas en la ciudad según Gonzalez & Rojas (2018) y a pesar de que históricamente ha sido afectada por problemas de plagas, se considera una de las especies más estables y menos propensa a fenómenos de caída, de acuerdo con los registros de volcamiento de árboles de la entidad.

Tabla 1 Especies, número de muestras y valores de diámetro de los individuos evaluados

|                         | Número de                    | Diámetro (cm) |      | Clase de diámetro (cm) |           |            |
|-------------------------|------------------------------|---------------|------|------------------------|-----------|------------|
| Especie                 | evaluaciones<br>tomográficas | Min           | Max. | 30-60                  | 60-90     | Mayor a 90 |
| Eucalyptus globulus     | 95                           | 47            | 244  | 5                      | 39        | 52         |
| Eucalyptus cinerea      | 49                           | <i>36</i>     | 116  | 16                     | 24        | 9          |
| Fraxinus chinensis      | 76                           | 38            | 159  | 159                    | <i>85</i> | 26         |
| Cupressus<br>Iusitanica | 64                           | 28            | 273  | 11                     | 18        | <i>35</i>  |
| Acacia spp.             | 41                           | <i>30</i>     | 120  | 120                    | 66        | 20         |
| Pinus patula            | <i>35</i>                    | <i>36</i>     | 159  | 14                     | 13        | <i>5</i>   |

Los valores mínimos registrados para la velocidad de onda, fueron similares en las especies *Eucalyptus globulus* y *Cupresus lusitánica* con bajos valores de velocidad de onda, registrando 333 y 391 m/s respectivamente (Tabla 2). En cuanto a la velocidad máxima, solo *Pinus patula* presentó valores mínimos con diferencia estadística de las demás especies, con un valor de velocidad de propagación de onda de 1673 m/s. Para la especie *Acacia spp.* se reportó un valor de velocidad máxima de 2456 m/s, cercano al valor determinado por Espinosa et al (2016), en estudios de segmentación con imágenes tomográficas para esta especie en la ciudad de Bogotá.

Tabla 2 Valores mínimos y máximos de velocidad de propagación de onda registrados para las especies analizadas

| Especie              | Número de<br>evaluaciones<br>tomográficas | Velocidad de<br>propagación de onda<br>en m/s |        |
|----------------------|---|---|--------|
|                      |   | Min   | Máx.   |
| Eucalyptus globulus  | 95  | 333a  | 2120b  |
| Cupressus Iusitanica | 64  | 391a  | 2120b  |
| Pinus patula         | 35  | 517b  | 1673 a |
| Fraxinus chinensis   | 76  | 519b  | 2340b  |
| Eucalyptus cinerea   | 49  | 526b  | 2239b  |
| Acacia spp.          | 41  | 605b  | 2456b  |

Medias seguidas de la misma letra en la vertical no difieren entre si según la prueba de Scott-Knott al 5% de probabilidad.

De acuerdo con el análisis visual y de la matriz de datos correspondiente a las tomografías de las especies evaluadas, las especies *Eucalyptus globulus* (34), *Fraxinus chinensis* (24) y *Cupressus lusitánica* (15), presentaron la mayor cantidad de árboles evaluados en malas condiciones del tejido. (Ilustración 1). De la misma forma las evaluaciones tomográficas también reflejaron cantidades similares de árboles en buen 26, 15 y 14 para *Eucalyptus globulus*, *Fraxinus chinensis* y *Cupressus lusitánica* respectivamente, lo cual fue una herramienta que permitió determinar el estado interno del árbol y así recomendar los tratamientos silviculturales tendientes a la conservación o tratamiento de estos individuos. Con relación a la especie *Acacia spp.*, se pudo establecer con las evaluaciones realizadas y de acuerdo a los registros de volcamiento de la entidad, que es la especie más afectada por problemas de pudrición asociados a tronco y raíz.

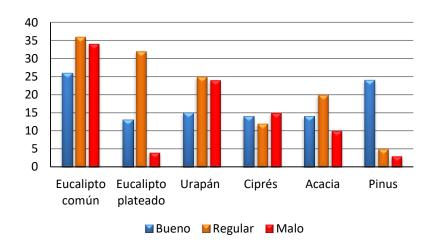


Ilustración 1 Estado del tejido leñoso por análisis visual de la imagen tomográfica para las especies del estudio

A continuación se presentan ejemplos de árboles en los tres estados (Bueno, malo y regular) del grupo de datos mencionado en el presente documento. Es importante mencionar que a dichos arboles se les ha realizado el seguimiento al tratamiento silvicultural recomendado.

# 7.3.1 Árbol en mal estado: Ejemplo *Acacia melanoxilon*

# Ficha Técnica

mecánica

Tabla 3 Ficha técnica Acacia melanoxilon

| Tabla 3 Ficha técnica Acacia melanoxilon   |  |  |
|--|--|--|
| Nombre común   | Acacia japonesa                                |  |
| Nombre científico  | Acacia melanoxilon                             |  |
| Diámetro   | 108 cm   |  |
| Numero de sensores   | 8  |  |
| Altura de la prueba  | 16 cm del nivel del suelo                      |  |
| Localización   | Calle 64 N° 7-71<br>Localidad: Chapinero       |  |
| Velocidad de onda mínima   | 249 m/s  |  |
| Velocidad de onda máxima   | 2450 m/s                                       |  |
| Momento de resistencia residual  | 45%  |  |
| Figura 30 Pudrición localizada árbol Acacia  | Figura 31Imagen tomográfica 2D árbol Acacia    |  |
| 16: 16 cm   16 |  |  |
| Figura 33 Gráfico modulo de modelación   | Figura 32 Fotografía tocón posterior a la tala |  |

### • Análisis de datos

Se puede observar en este individuo, de acuerdo a la matriz numérica de los datos, que presenta bajas velocidades entre los sensores 7, 6, 5. 8 y 4. En la imagen tomográfica, se aprecia la coloración púrpura y rojo, que corresponde a velocidades de propagación de onda bajas (249 m/s). Esto denota que en el área transversal correspondiente a la sección evaluada, se presenta tejido afectado por pudrición o una posible cavidad en una amplia región de esa sección transversal. Este diagnóstico se corroboró en la fotografía del tocón, tomada posterior a la actividad de tala. De esta manera, para este individuo la inspección y evaluación por medio de la tomografía, se constituye en una herramienta eficaz para la determinación de las posibles afectaciones del estado interno del tronco.

## • Modelación mecánica

Es posible observar que existe una pérdida de resistencia mecánica residual en sentido suroccidente-nororiente de aproximadamente 45%, lo cual corrobora la baja capacidad de sustentación del tejido afectado por pudrición en el sentido opuesto.

# • Recomendación de manejo

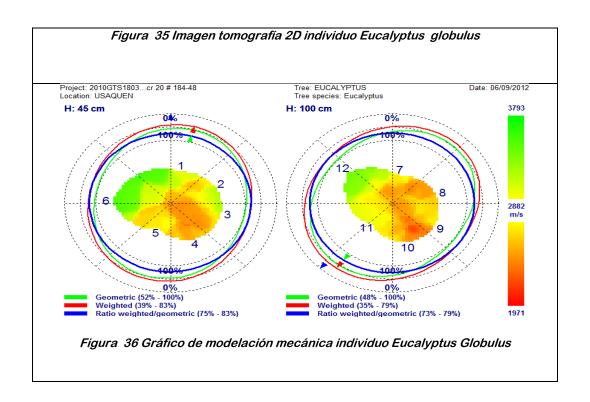
La recomendación para este individuo arbóreo dadas las condiciones internas y de emplazamiento es de remoción o tala.

# 7.3.2 Árbol en regular estado: Ejemplo *Eucalyptus globulus*

# Ficha técnica

Tabla 4 ficha técnica Eucalyptus globulus

| Nombre común  | Eucalipto común  |
|---|--|
| Nombre científico                                       | Eucalyptus globulus  |
| Diámetro  | 60 cm y 57 cm  |
| Numero de sensores                                      | 10   |
| Altura de la prueba                                     | Dos niveles 45 y 100 cm del nivel del suelo                |
| Localización  | Calle 20 Nº 184-48 Usaquén                                 |
| Velocidad de onda mínima                                | 924m/s   |
| Velocidad de onda máxima                                | 2524 m/s   |
| Momento de resistencia residual                         | 20%  |
| Figura 33 Aspecto exterior árbol Eucalipto              | Figura 34 Detalle gomosis localizada árbol Eucalipto       |
| Project: 2010GTS1803cr 20 # 184-48<br>Location: USAQUEN | Tree: EUCALYPTUS Date: 06/09/2012 Tree species: Eucalyptus |
| H: 45 cm  | H: 100 cm 3793   |
| 30 cm   | <u> 30 cm</u>  |
| 2 2 3 5 6 80 cm   | 2882 m/s   |



### Análisis de datos

En este caso se realizaron dos pruebas, una a 45 cm y otra a 100 cm del nivel del suelo. Los valores mínimos registrados de 924 m/s indican en general un tejido en buen estado, sin indicios de pudrición o tejido afectado. En la evaluación se diferenció la variación de densidad entre las regiones central y periférica de la sección transversal. Las áreas en color rojo y amarillo corresponden a valores entre 924 m/s y 1500 m/s es decir madera de media densidad, sin embargo puede considerarse tejido en regular

#### Modelación mecánica

estado v

En cuanto a la modelación mecánica, se evidencia una disminución del 30% en la resistencia mecánica para la sección evaluada a 100 cm de la altura del suelo en sentido Nororiente-Suroccidente. Sin embargo este valor no representa afectación para la capacidad de sustentación del tronco.

#### Recomendación de manejo

La recomendación para este individuo como medida de prevención, es realizar seguimiento y evaluación posterior para verificar el avance en la perdida de resistencia mecánica, sin embargo no se considera realizar la tala, pues no presenta afectaciones internas en el tronco.

# 7.3.3 Árbol en buen estado: Ejemplo *Pinus patula*

# Ficha Técnica

Tabla 5. Ficha técnica Pinus patula

| Nombre común   | Pino   |
|--|--|
| Nombre científico  | Pinus patula   |
| Diámetro   | 50 cm  |
| Numero de sensores   | 8  |
| Altura de la prueba  | 80 cm del nivel del suelo  |
| Localización   | Carrera 4 Nº 79B60 Chapinero   |
| Velocidad de onda mínima   | 1120 m/s   |
| Velocidad de onda máxima   | 1978 m/s   |
| Momento de resistencia residual                                    | 45%  |
| Figura 37 Aspecto exterior árbol de Ciprés                         | Figura 38 Detalle sensores en el árbol   |
| Per Copessus Instances The spoors. Operans  1510  2  3  4  4  4  4 | Tree Cognesses Instances Tree spores Cognesses H: 90 cm 1910   |
| Figura 39 Gráfico 2D del individuo de Ciprés                       | Weighted (17th. 1994)  Figura 40 Gráfico de modelación mecánica  Tillo Trigura 40 Gráfico de modelación mecánica |

#### Análisis de datos

Se realizó una prueba tomográfica a 90 cm de la base del suelo. La imagen muestra una de las bifurcaciones del árbol de Ciprés ubicada en el costado oriental del árbol. Se observa en la imagen una área distribuida con madera de alta densidad y uniforme a lo largo de esta sección del tronco, lo cual denota tejido interno en buen estado.

### • Modelación mecánica:

El análisis mecánico evidenció una susceptibilidad del 20 % de reducción de resistencia en sentido Noroccidente- Suroriente, lo cual está acorde con la inclinación del árbol en ese sentido.

# • Recomendación de manejo

A pesar que el estado interno del árbol no evidenció la presencia de descomposición o cavidades, el análisis mecánico del árbol indica una pérdida media del 25% de la resistencia mecánica, lo cual puede resultar en reducción progresiva de la verticalidad y aumentar riesgo de volcamiento, sumado a que se encuentra en zona de pendiente. En este sentido una poda de estabilidad sería conveniente debido a las condiciones de inclinación y emplazamiento del árbol.

#### 8. DETERMINACION DE LAS RECOMENDACIONES DE MANEJO SLVICULTURAL

Para que la herramienta de evaluación con tomografía de impulso permita auxiliar la toma de decisiones sobre tratamientos silviculturales, es importante analizar tanto los datos numéricos (velocidades mínimas y máximas registradas, analizar visualmente la imagen tomográfica para verificar el tamaño, localización y extensión de las afectaciones, así como la modelación mecánica, esto con el fin de generar un insumo técnico y científico que permita fortalecer la evaluación visual y sugerir un concepto técnico más acertado.

Es importante resaltar que la evaluación tomográfica complementa la evaluación visual o VTA - Visual Tree Assessment (Mattheck, 2007) además de las condiciones de emplazamiento, altura, porte, inclinación y demás defectos del tronco, entre otros factores. Este es el método más utilizado e internacionalmente reconocido para inspección y valoración de árboles basado en sus características externas.

A pesar que no es posible establecer valores de referencia de forma general, pues cada condición de evaluación es particular del individuo arbóreo y requiere de un minucioso análisis de las condiciones internas del árbol, características del entorno y de la especie, se pudo establecer de acuerdo a las observaciones y análisis de los datos recopilados en el presente estudio las siguientes recomendaciones (tabla 6):

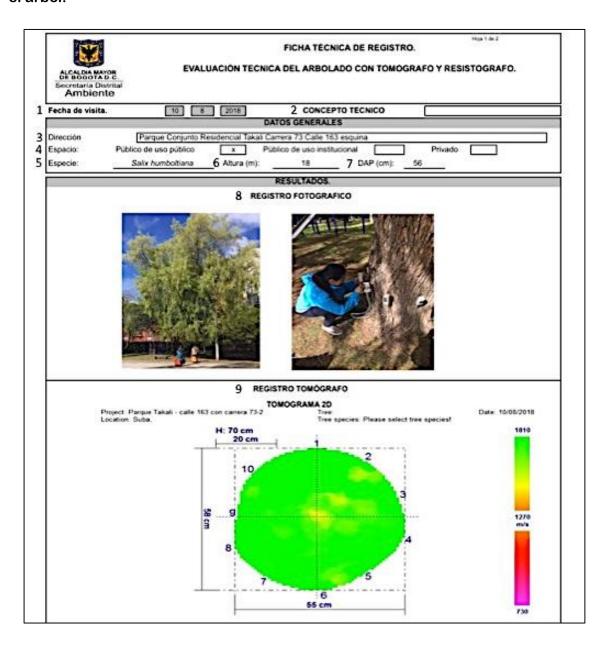
Tabla 6 . Recomendaciones de manejuo con relación a las velocidades de onda

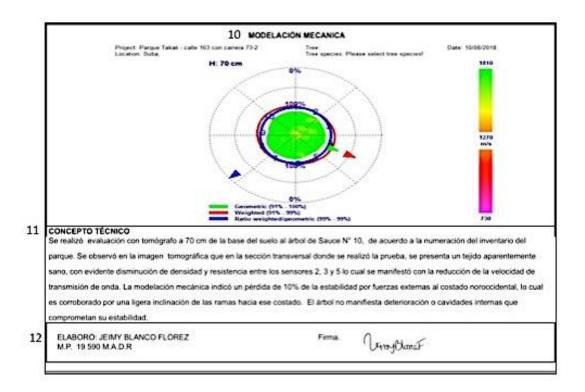
| Velocidades de<br>propagación de onda | Posible condición del tejido leñoso  | Recomendación de manejo  |
|---------------------------------------|--|--|
| Menores a 300 m/s                     | Madera de baja densidad, posibles<br>cavidades, pudrición o tejido con<br>algún tipo de afectación. Mal estado | Para árboles que presenten una magnitud considerable de cavidades o tejido afectado con pudrición representado por velocidades de onda inferiores a 300 m/s, sumado al análisis de momento residual y las condiciones de emplazamiento se deberá determinar el tratamiento silvicultural de tala, como medida de prevención de eventos de caída o volcamiento del árbol. |
| 300 m/s a 1000                        | Madera de baja a media densidad.<br>Regular estado   | Para árboles que presenten este rango de valores de velocidad de onda, es importante programar seguimiento con tomografía con el fin de observar el estado de avance de tejido a una pudrición incipiente.   |
| 1000 m/s a 1500 m/s                   | Madera de media a alta densidad.<br>Buen estado  | Árbol tendiente a la conservación o manejo mediante podas, de acuerdo al criterio de la evaluación visual.   |
| Superiores a 1500 m/s                 | Madera de alta densidad y tejido intacto. Buen estado  | Árbol tendiente a la conservación o manejo mediante podas, de acuerdo al criterio de la evaluación visual.   |

NOTA: Recuerde que el análisis visual de la imagen tomográfica depende de la paleta de colores asignada en el tipo de filtro y de establecer manualmente los valores mínimos y máximos de acuerdo a los datos observados por especie, por lo que es necesario evaluar las velocidades de propagación de onda de la matriz numérica de datos para evitar interpretaciones erróneas.

# 9. MODELO DE FICHA TÉCNICA DE REGISTRO- EVALUACIÓN TÉCNICA DEL ARBOLADO CON TOMÓGRAFO Y RESISTÓGRAFO

El siguiente formato debe diligenciarse posterior a la realización de visita con los equipos especializados y adjuntarse al respectivo concepto técnico, con el fin de que sirva de soporte técnico para recomendación del tratamiento silvicultural a realizar en el árbol.





# Instructivo de diligenciamiento:

- 1. Fecha de visita: Ingrese la fecha de la evaluación con tomografía
- 2. Concepto Técnico: Diligencie en el caso que el árbol tenga algún tipo de antecedentes
- 3. Dirección: Especifique la dirección dell sitio de la evaluación
- 4. Espacio: Seleccione si correponde a espacio público o privado
- 5. Especie: Coloque el nombre científico de la especie evaluada
- 6. Altura Especifique los datos correspondientes a altura total del árbol
- 7.D.A.P: Especifique los datos correspondientes al diámetro
- 8.Registro fotográfico: Coloque fotografía general y de detalle de la evaluación del individuo arbóreo
- 9.Registro tomografo: Coloque la imagen exportada en JPG correspondiente al gráfico de superficie 2D
- 10.Modelación mecanica: Coloque la imagen exportada en JPG correspondiente al gráfico del modulo de modelación mecanica.
- 11.Concepto técnico: De acuerdo con las recomendaciones de este documento, describir la altura a la cual se realizó la tomografía, el número de secciones 2D o 3D que se evaluaron. Indicar el estado del tejido de acuerdo a la evaluación visual, resaltando si se observan defectos, una posible pudrición o cavidades en la sección, de acuerdo con el análisis de las velocidades de propagación de onda, mencionar los sensores en los cuales se presenta la posible afectacion. Analizar el gráfico mecánico en el módulo de mde omento resistencia residual e indicar la pérdida de resistencia y el sentido geográfico en el cual se presenta. Finalmente realizar un breve análisis y diagnóstico

general del estado interno de esta sección, lo cual servirá como insumo paracomplementar el concepto tecnico de evaluación vidual del arbolado.

12. Nombre y matrícula profesional del ingeniero que realizó la evaluación y análisis

### **10. CONCLUSIONES**

- ✓ El uso de tecnologías de evaluación y diagnóstico con equipos especializados se constituye en una herramienta más precisa para determinar el estado interno de los árboles urbanos y fortalecer la toma de decisiones en materia de tratamientos silviculturales como complemento a la evaluación visual.
- ✓ La evaluación con tomografía debe realizarse para identificar y cuantificar un defecto previamente identificado en la evaluación visual por parte del profesional forestal y de esta forma recomendar el tratamiento a realizar en el árbol.
- ✓ La interpretación de los resultados por parte del profesional forestal es fundamental para la utilización de esta herramienta, ya que se deben considerar las diferencias en el comportamiento de las especies debido a los parámetros inherentes a la anatomía y densidad de las diferentes especies, así como la complejidad de la transmisión de la onda en el sentido transversal de la madera (radial y tangencial), que está sujeta a la influencia de diversas variables y que puede dar lugar a diversas interpretaciones.

El número de sensores colocado al árbol influye en la calidad de la imagen tomográfica y en la precisión de la información, esto depende de cada situación, sin embargo, se recomienda emplear un número mínimo de 10 sensores para árboles de 30 cm a 60 cm de diámetro. Para árboles con diámetros superiores a 60 cm de diámetro debe emplearse de 12 a 18 sensores.

- ✓ El análisis visual de la imagen tomográfica depende de la paleta de colores asignada en el tipo de filtro y de establecer manualmente los valores mínimos y máximos de acuerdo a los datos observados, por lo que es necesario evaluar las velocidades de propagación de onda de la matriz numérica de datos para evitar interpretaciones erróneas.
- ✓ Velocidades de propagación de onda entre 300 m/s corresponden a madera de baja densidad, posibles cavidades, pudrición o tejido con algún tipo de afectación y es recomendable que de acuerdo a la importancia de la magnitud de la afectación se realice la tala o remoción del individuo.
- ✓ No es recomendable realizar tomografías en Palmas debido a que la conformación microscópica de los tejidos, de tipo hueco y el alto contenido de humedad influye en la transmisión de la onda, lo que puede indicar posibles afectaciones internas por las bajas velocidades de onda transmitidas, sin embargo el individuo puede encontrarse en buen estado.

- ✓ El análisis de los datos recopilados por la Secretaria Distrital de Ambiente permitió determinar diferencias para las velocidades de propagación de onda de las especies Eucalyptus globulus y Cupressus lusitánica con las más bajas velocidades de onda registradas. Con relación a las velocidades máximas, se indica que la especie *Pinus patula* presentó rangos de velocidad menor que las demás especies que presentaron comportamiento similar en los valores máximos registrados.
- ✓ La recomendación de manejo con base en la tomografía no es conclusiva por si misma y debe complementarse en el análisis del entorno del árbol, para ello es necesario realizar evaluación conjunta de la condición interna del tronco y las características de emplazamiento para realizar la recomendación silvicultural más adecuada.

### 11. BIBLIOGRAFIA

Arciniegas, et al. (2014) Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing tres Trees (2014) 28:1559–1567 p 19-21

Avenserq. P. 2015 Apprécier lA d'Angerosité des Arbres d'ornement : une Approche complexe. Dossier L'arbre et l'expert - Jardins de France 634 - Mars-avril 2015

Bucur, (2003). Nondestructive Characterization and Imaging of Wood. 354p

Calaza, M.P, Iglesias, M.J (2016) El riesgo del arbolado urbano. Contexto, concepto y evaluación.526p

Chavesta C. M. (2006). Separata de capacitación sobre identificación de madera. Perú. 8-13p.

Espinosa et al. (2016). Automatic segmentation of acoustic tomography images for the measurement of wood decay Wood science and Technology 51 (1).

Evert, R. F. (2013) Anatomia das plantas de Esau, meristemas, células e tecidos do corpo da planta: sua estrutura, função e desenvolvimento. Ed. Blucher., 648p.

Fontes, L.R. Considerações sobre a complexidade da interação entre o cupim subterrâneo, *Coptotermes havilandi*, e a arborização no ambiente urbano. In: FONTES, L.R.; BERTI FILHO, E. Cupins: o desafio do conhecimento. Piracicaba: FEALQ, 1998. p. 109-124.

Gonzalez, R. Rojas, J. 2018. Análisis del sistema de información para la gestión del arbolado. Valoración de bienes y servicios del arbolado urbano. Nota técnica N° 10 CIMAB-Secretaria Distrital de Ambiente. p 1-13

Johnstone, D. Tausz, M. Moore, G. And Nicolas, M. 2010 Quantifying. Wood Decay in Sydney Bluegum (*Eucalyptus saligna*) Trees. Arboriculture & Urban Forestry. 36(6): 243-252

Lin, C. J. et al. 2011. Stress wave tomography for the quantification of artificial hole detection in camphor trees (Cinnamomum camphora). Taiwan Journal of Forest Science, v. 26, n. 1, p. 17-32,

Mattheck, C. 2007. Updated Field Guide for Visual Tree Assessment. Karlsruhe Research Center Karlsruhe. 170 pp.

Oliveira, et al. 2005 Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. Rev Árvore. 29 (1) Viçosa.

Ostrovský, R., Kobza, M. and Gaþo, J. 2017. Extensively damaged trees tested with acoustic tomography consider- ing tree stability in urban greenery. Trees – Structure and Function 31(3): 1015-1023.

Pellerin, R.F., & Ross, R.J. Editors. (2002). Nondestructive Evaluation of Wood. Forest Products Society. USA. 210 p

Pereira, L.C. et al. 2007. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. Revista da sociedade brasileira de arborização urbana. 2 (2).p 65-75

Rabe, C. Ferner, D. Fink, S. Schwarze, W.M.R. (2004) Detection of decay in trees with stress waves and interpretation of acoustic tomograms. Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry, 28.p. 3-19

Rinn, 2011) Rinn, F. 2011. Basic Aspects of Mechanical Stability of Tree Cross–Sections. Arborist News, Feb 2011, 20(1):52-54.isa

Rinntech, 2005. User Manual – Arbotom 3-D Tree Impulse Tomograph, version 1.59 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. 42p.

Ross, R. J.; Pellerin, R. F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. General Technical Report, FPL-GTR-70, USDA Forest Service, 40p., 1994.

Schwarze, F.W.M.R., J. Engels, and C. Mattheck. 2000. Fungal Strategies of Wood Decay in Trees. Springer, New York, NY.

Shigo. A.L. 1989. A new tree biology: facts, photos, and philosophies on tree and their problems and proper care. Durham: New Hampshire, 618 p.

Tovar, G.T Manejo del arbolado urbano en Bogotá. Territorios.16 -17 / Bogotá 2007, pp. 149-174

Wang, X. et al. 2004. Assessment of decay in standing timber using stress wave timing non- destructive evaluation tools: a guide for use and interpretation. General Technical Report FLP-GTR-147, Madison, US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, WI, 12p.

Wang, X.; Ross, R. J.; Carter, P. (2007). Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part 1. Acoustic wave behavior in standing trees. Wood and Fiber Science, v. 39, n. 1, p. 28–38,

Wang, X.; Allison, R.B. (2008). Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. Arboriculture & Urban