

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA

**APLICACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS PARA LA
DETECCIÓN DEL CILINDRO DEFECTUOSO CENTRAL
EN ÁRBOLES PODADOS DE *Pinus radiata* (D.Don)**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

RICARDO ANDRÉS MÉNDEZ SALAZAR

Profesor Guía: Sr. José Tomás Karsulovic Carrasco
Ingeniero Civil Mecánico
Ingeniero de L'Ecole Supérieure du Bois (París)

**SANTIAGO - CHILE.
2003**

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA

APLICACIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS PARA LA DETECCIÓN DEL CILINDRO DEFECTUOSO CENTRAL EN ÁRBOLES PODADOS DE *Pinus radiata* (D.Don)

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

Ricardo Andrés Méndez Salazar

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Tomás Karsulovic C.	6,8
Prof. Consejero Sr. Adolfo León C.	6,8
Prof. Consejero Sr. Javier González M.	6,0

SANTIAGO-CHILE

2003

**“No olvides que el perdón es lo
divino y errar a veces suele ser
humano...”**

**A DIOS
A mi madre ISOLINA
A mi padre MARIO
A mi querida hermana VERONA**

AGRADECIMIENTOS

Para comenzar quisiera agradecer a mi familia, ya que gracias al apoyo incondicional, a su constante motivación y a la formación entregada por ellos, puedo hoy dar por terminada esta etapa en mi vida.

Gracias a Don Tomás Karsulovic C., mi profesor guía, por haber depositado su confianza en mí, por sus oportunos y sabios consejos, por el valioso tiempo dedicado a éste trabajo, y sobre todo por su infinita paciencia.

Les agradezco a mis profesores consejeros Adolfo León y Javier González los valiosos comentarios entregados y por aportar sus conocimientos en el desarrollo y corrección del presente estudio.

A mis amigos que de una u otra manera colaboraron desinteresadamente conmigo: Ricardo Pavez, Marcelo Ramírez, Andrés Barrios, Marcia Medina, Raúl Caprile, Andrés Susaeta, Marco Carvajal, M. Loreto Rivera y otros tantos que se me pueden escapar. Acá no puedo dejar de mencionar a Mónica Acuña P. por haber sido un pilar fundamental durante mi época de estudiante.

Para el personal del Departamento de Ingeniería de la Madera de la Universidad de Chile, en especial Francisco Gallardo P., Luis Frías, Paola Madariaga, Víctor Gaete, Luis Espina y Patricio Vergara.

Al Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONDECYT), por el financiamiento aportado para la realización de ésta Memoria. A Forestal Arauco por proporcionar el material de ensayo para este estudio.

En fin, a todos lo que confiaron en mí.-

ÍNDICE

RESUMEN

Palabras Claves

SUMMARY

Keywords

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Generalidades sobre <i>Pinus radiata</i> (D. Don).....	2
2.1.1. Antecedentes generales de la especie.....	2
2.1.2. Sus tratamientos Silviculturales.....	2
2.1.3. El proceso de Oclusión.....	3
2.1.4. Cilindro Defectuoso Central y sus componentes.....	4
2.1.5. Madera libre de nudos.....	5
2.1.6. Metodologías usadas actualmente para la predicción del DCD.....	6
2.2. Generalidades sobre Metodología Ultrasónica	7
2.2.1. Definiciones.....	7
2.2.2. Propagación de las Ondas Ultrasónicas en la madera.....	8
2.2.3. Estudios relacionados con la madera.....	9
3. MATERIALES Y MÉTODO	11
3.1. Materiales.....	11
3.1.1. Material de ensayo.....	11
3.1.2. Equipos utilizados.....	11
3.2. Método.....	13
3.2.1. Obtención del material de ensayo.....	13
3.2.1.1. Obtención de rodela.....	13
3.2.1.2. Obtención probetas.....	14
3.2.2. Estudio morfológico de la singularidad.....	16
3.2.3. Ensayos ultrasónicos en madera libre de nudos.....	16
3.2.4. Detección del cilindro central defectuoso.....	17
3.2.5. Posicionamiento de nudos en probetas cúbicas.....	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1. Determinación de las características físicas del material.....	21
4.2. Resultados propagación ultrasónica.....	23
4.2.1 Lecturas obtenidas en viguetas.....	23
4.2.2. Lecturas obtenidas en probetas.....	33

4.3. Resultados del estudio morfológico de la singularidad.....	44
4.4. Ensayos ultrasónicos en madera libre de nudos.....	44
4.5. Detección del cilindro central defectuoso.....	45
4.6. Posicionamiento de nudos en probetas cúbicas.....	45
5. CONCLUSIONES.....	57
6. BIBLIOGRAFÍA.....	58
ANEXOS	

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo principal estudiar la aplicación de las ondas ultrasónicas para la determinación del diámetro del cilindro defectuoso en trozas podadas de *Pinus radiata* (D. Don), y fue posible gracias al financiamiento del proyecto FONDECYT N° 1990680.

Se determinó la densidad básica y el contenido de humedad para una parte del material en estudio, se obtuvo gradientes diametrales de la variación de éstas propiedades encontrándose para la densidad una distribución uniforme y para el contenido de humedad una distribución parabólica.

Los ensayos para la determinación de la velocidad del ultrasonido se hicieron a nivel de viguetas y probetas sin obtener relaciones claras entre la variabilidad de la velocidad y la posición radial.

Se prepararon rodela con y sin nudos para determinar el cilindro defectuoso mediante ensayos ultrasónicos, no siendo esto posible debido a que con los equipos disponibles no se obtuvo la suficiente energía para lograr efectuar las mediciones.

En muestras cúbicas que contenían un nudo se les realizó ultrasonografías en los tres ejes ortotrópicos, con lo cual se pudo establecer que tanto en dirección radial y tangencial ellas aportan información para el posicionamiento del nudo.

Se concluye que la técnica ultrasónica es factible para determinar la ubicación de la singularidad en condiciones de laboratorio, y si se quiere llevar a la práctica en terreno se deben utilizar equipos que generen la energía suficiente como para trabajar en árboles en pie.

Palabras claves: *Pinus radiata*, ultrasonido, cilindro defectuoso, nudos

SUMMARY

The main aim of this study was to study the application of the ultrasonic waves for the determination of the defect core size in pruned logs of *Pinus radiata* (D. Don), and it was possible due to the funding of FONDECYT N° 1990680.

Both the basic density and the moisture content for a part of the study material were determined; variation diametrical gradients of these properties were obtained, and for the density obtaining a uniform distribution while for moisture content obtaining a parabolic distribution.

The tests for the determination of the ultrasound velocity were made at both beam levels and wood samples without obtaining clear relations between the velocity variability and the radial position.

Wood transversal sections were prepared with and without knots for ultrasonic tests to determine the defect core, this not being possible because enough energy was not obtained to make the measurements with the available equipment.

Ultrasonic scanning was made in cubical samples that had a knot. This was made in three orthotropic axes. Thus, it was possible to state that both radial direction and tangential direction contribute with information for the positioning of the knot.

It was concluded that the ultrasonic technique is feasible to determine the knot location in laboratory conditions, and if this is wished to be taken place in forests, equipments able to generate enough energy should be used in order to measure standing trees.

Keywords: *Pinus radiata*, ultrasound, defect core, knots

1. INTRODUCCIÓN

Pinus radiata (D. Don) es la especie productora de madera más importante del país en la actualidad, ya que presenta múltiples ventajas como es el rápido crecimiento, gran respuesta a tratamientos silviculturales, etc. Hoy en día existen alrededor de 2 millones de ha. de plantaciones de las cuales un porcentaje importante se encuentran sometidas al manejo con el objetivo de obtener madera de mayor calidad.

Una de las principales intervenciones que se le realizan a las plantaciones de pino radiata es la poda, la cual tiene como objetivo la eliminación de las ramas que no influyen directamente en el crecimiento del individuo, además de la obtención de la madera libre de nudos o madera Clear. La ejecución de ésta implica que la zona que presenta los llamados nudos y las cicatrices del corte queden confinados al sector central del fuste, en lo que se le ha llamado Cilindro Defectuoso Central.

La madera Clear ha concitado gran interés debido a que posee ventajas como la mayor uniformidad de propiedades mecánicas y su atractivo visual, lo que ha influido en que sea muy bien cotizada en los mercados mundiales, ya que su utilización no es solo como madera estructural, sino que además participa activamente en la fabricación de tableros contrachapados y como madera decorativa.

Se hace necesario en la actualidad contar con herramientas que ayuden e incentiven a la producción de productos de alto valor agregado y de alta calidad. Por ello desde hace algunos años el Manejo de los Bosques ha sido complementado con instrumentos y procesos que son resultado de la aplicación del avance tecnológico.

Siguiendo la tendencia antes señalada el Departamento de Ingeniería de la Madera de la Universidad de Chile, mediante el proyecto FONDECYT N° 1960419 se encuentra desarrollando una línea de investigación en el estudio de técnicas no destructivas para la detección de singularidades en la madera de pino radiata, en que una de sus aplicaciones corresponde al presente trabajo.

El objetivo general del presente trabajo es el estudio de la aplicación de las ondas ultrasónicas para la determinación del diámetro del cilindro central defectuoso en trozas podadas de *Pinus radiata* (D. Don).

Los objetivos específicos que se establecieron son los siguientes: determinación de la forma de propagación (transmisión o eco) y de la frecuencia de las ondas ultrasónicas con relación a las características físicas y morfológicas del material; identificar los parámetros predictores más eficaces para la detección del cilindro central defectuoso y establecer la metodología de mayor eficiencia para la determinación del diámetro del cilindro central defectuoso, a nivel de trozas y de árboles en pie.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Generalidades sobre *Pinus radiata* (D. Don)

2.1.1. Antecedentes generales de la especie (SERRA, 1987)

Pinus radiata (D. don) es una conífera perteneciente a la familia Pinaceae, esta última en la actualidad está representada por nueve géneros y con alrededor de 250 especies de árboles, en su mayoría en el hemisferio norte.

Esta especie es nativa de la zona costera de Monterrey, actualmente distribuidas en masas aisladas, de las cuales las de mayor importancia son las de Cambria, Monterrey y Swantón ubicadas entre los 35° y 37° L.N. y 10 a 11 Km. tierra adentro en las Costas de California.

En su hábitat natural se presentan las precipitaciones se concentran en su mayoría en invierno, variando su monto anual entre 400 mm y 900 mm, y temperaturas medias de 10°C y 14°C en invierno y verano respectivamente.

Hoy en día en nuestro país la encontramos en plantaciones que alcanzan alrededor de 2 millones de hectáreas, constituyendo la especie principal productora de madera a nivel nacional.

2.1.2. Sus tratamientos Silviculturales

En nuestro país son dos los tratamientos silviculturales principales que se le realizan a la especie, estos son las cortas intermedias de Raleo y Poda, las cuales persiguen mejorar las condiciones de desarrollo de los ejemplares seleccionados para entregar productos finales.

- **El Raleo** : Son cortas realizadas en un rodal en las etapas de latizal y fustal cuyo propósito general es aumentar la tasa de crecimiento en diámetro de los árboles que quedan, y específicamente en caso de producción de madera aserrada el aumentar el volumen de esta al término de la rotación.

- **La Poda** : Es definida como la eliminación de las ramas que no influyen en forma efectiva en el desarrollo del individuo (CONAF, 1983), y tiene como objetivo fundamental maximizar la producción de madera libre de nudos, limitando la zona nudosa a un cilindro central de diámetro mucho menor al del individuo.

Como objetivos secundarios de la poda se pueden mencionar el mejorar la forma del árbol, la calidad de la madera, la fructificación y obtención directa de productos, además de la disminución del peligro de incendios, mejorar la transitabilidad por el rodal. (MONTROYA, 1988).

Cabe mencionar que existen dos tipos de poda :

- **Poda Natural** : En la cual las ramas inferiores y bajo la presión de la competencia van perdiendo sus hojas, con lo cual el flujo de savia se interrumpe y la rama va muriendo desde el ápice hacia la inserción en el fuste. Posteriormente y por la acción de agentes biológicos (hongos insectos) y otros físicos (peso, viento, golpes, etc.) la rama tiende a desprenderse en forma natural completándose el proceso de la poda y en la herida empieza el fenómeno de oclusión o cicatrización.

- **Poda Artificial** : Existen especies en que no mueren las ramas inferiores o no caen naturalmente, esto hace necesaria la intervención de la mano del hombre para la eliminación artificial por medios mecánicos de estas ramas. Una vez hecho esto la herida queda en las mismas condiciones antes descritas y comienza la oclusión y formación del nudo.

Pinus radiata (D. don) como la gran mayoría de las coníferas no posee poda en forma natural y las intervenciones artificiales que se le realicen serán fundamentales para el futuro del árbol y el producto a obtener.

Como producto de la poda se originan los llamados nudos, que se pueden definir como una inclusión de la parte basal de la rama en el interior del fuste de un árbol (TSOUMIS, 1990).

Es importante mencionar y hacer diferencia entre dos tipos de nudos producidos por las ramas:

- **el nudo muerto**, que se produce cuando una vez muerta la rama esta sigue adherida al fuste produciendo una discontinuidad de crecimiento en la zona del cambium del árbol con lo cual dan origen a los nudos muertos o sueltos.

- **el nudo vivo**, el cual es efecto directo de la poda, y en el cual se elimina la rama antes o inmediatamente después de la muerte de esta, con el resultado de que el tejido cambial del fuste queda sin discontinuidades, ya que cicatriza como tejido vivo el cambium con la herida de oclusión, dando origen a los nudos vivos.

2.1.3. El proceso de Oclusión

Posterior a la intervención de poda tiene lugar el proceso de oclusión, que consiste en el cierre de la herida dejada por la faena realizada. Aquí se inicia un englobamiento en la madera del muñón de la rama la velocidad de este fenómeno va a depender directamente del crecimiento diametral del individuo en la zona adyacente a la herida. Además la profundidad del clavo de oclusión la determinarán factores como, el largo y diámetro del muñón, y cualquier daño asociado al proceso de la poda. KNOWLES (1970) encontró que la principal explicación de la profundidad de oclusión es el diámetro de las ramas, encontrando correlaciones de hasta 0.53. PALAZUELOS (1995) concluyó que existe una alta relación entre el tamaño de la rama (diámetro y radio sobre muñón) y la oclusión. A mayor tamaño de rama, el tamaño y tiempo de oclusión es mayor. Como contraparte MENESES Y VELASCO (1992) concluyen que la variación de la profundidad de oclusión se atribuye al azar.

Es importante recalcar que el proceso de oclusión se produce gracias a la savia descendente (savia elaborada por las hojas), por lo cual es de suma importancia que exista hojas verdes sobre la herida dejada por la poda. Además de acá se puede deducir el orden lógico del proceso, en que la cicatrización comienza desde ambos lados, posteriormente desde la cima y por último desde la base. (MONTROYA, 1988).

La correcta cicatrización de las heridas es el condicionante fundamental de las podas, y el plazo en que se debe producir la cicatrización completa debe ser lo suficientemente corto como para que no se inicien pudriciones que pueden llegar a afectar al tronco, deteriorando la madera o comprometiendo la estabilidad o duración de la vida productiva del árbol (MONTROYA, 1988).

Una vez formados los muñones y las heridas de oclusión, se puede observar que todas estas van quedando confinadas en el sector central del fuste (Figura N° 1), que acorde con podas hechas en forma oportuna este sector tendrá una forma cilíndrica y con diámetros que nos interesa conocer, como lo son el diámetro sobre muñón (DSM) y el diámetro sobre oclusión (DSO).

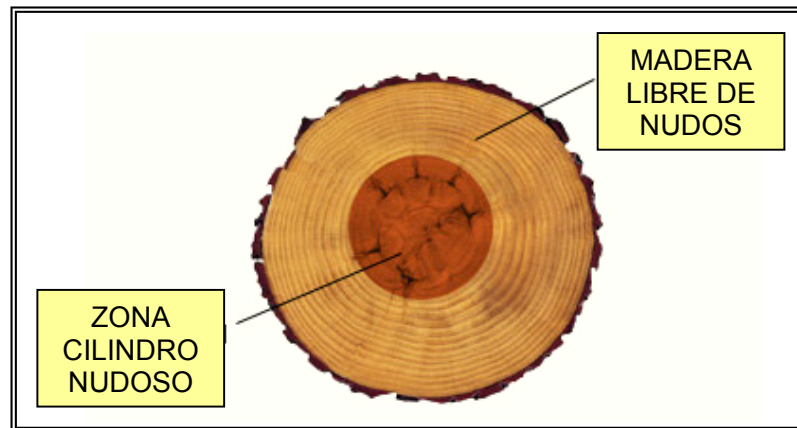


Figura N° 1: Corte transversal rodela

2.1.4. Cilindro Defectuoso Central y sus componentes

Los componentes que definen el diámetro del cilindro defectuoso central (DCD) son el diámetro máximo sobre muñón (DMSM), diámetro máximo sobre oclusión (DMSO) y la sinuosidad del fuste al momento de la poda (Figura N° 2) (PARK, 1982).

El diámetro sobre muñón (DSM) corresponde al diámetro del fuste a la altura de un verticilo determinado al cual se le ha realizado una poda. Posterior a la intervención tiene lugar el proceso de oclusión, que consiste en el cierre de la herida dejada por la faena realizada, con lo cual se define un nuevo parámetro, el diámetro sobre oclusión (DSO), que corresponde al diámetro sobre muñón más la profundidad de oclusión.

Tanto el DSM y el DSO alcanzan valores máximos en determinado verticilo del árbol, altura a la cual queda establecido el diámetro mínimo del cilindro defectuoso central, ya que debe considerarse aún la desviación que presente el fuste, con lo cual se establece en último término el tamaño final del cilindro nudoso central.

Las causas principales por las cuales el DMSM más su profundidad de oclusión no corresponden al DCD son la excentricidad de la médula y la variabilidad de la oclusión en la dirección radial, (MENESES Y VELASCO, 1992).

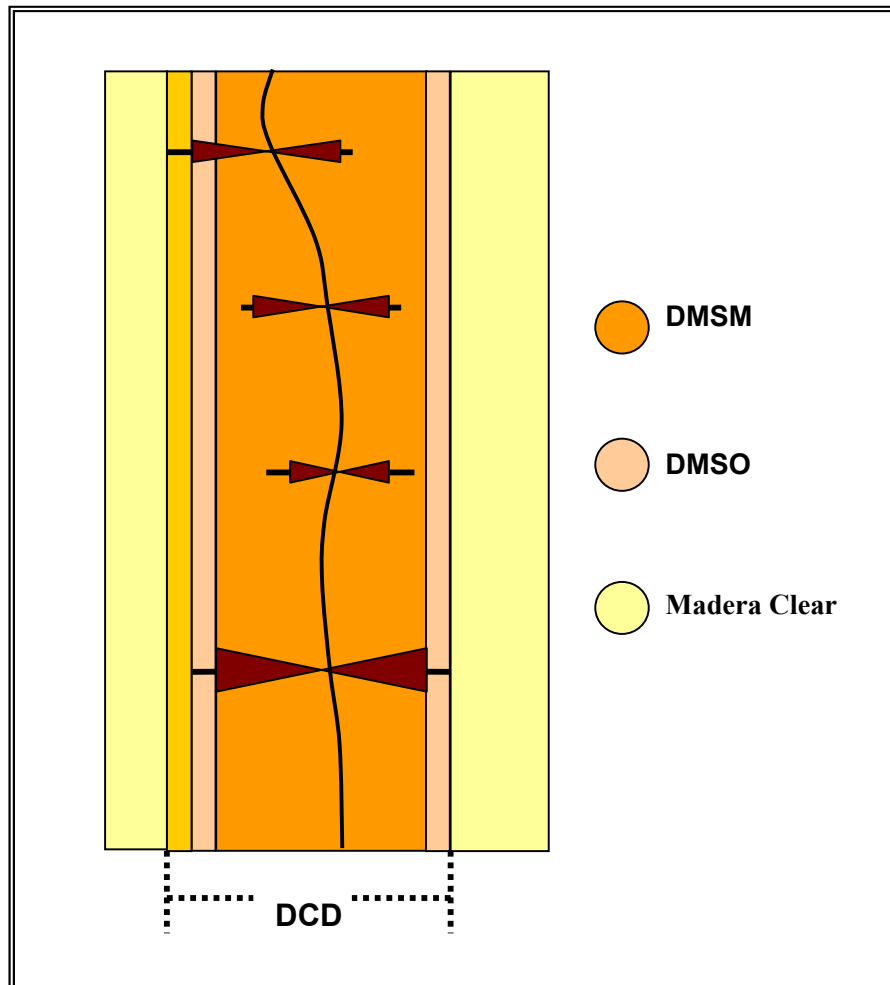


Figura N° 2: Diagrama del Cilindro Defectuoso Central

2.1.5. Madera libre de nudos

La cantidad de madera libre de nudos que se obtiene a partir de un individuo depende de tres factores principales, los cuales son el diámetro de la troza, el tamaño del cilindro defectuoso y la eficiencia de la conversión (PARK, 1982). VELASCO Y MENESES (1992) determinaron que las variables más significativas para el rendimiento de la madera libre de nudo son el diámetro menor de la troza, el diámetro del cilindro con defectos y el largo de la troza. Asimismo VELASCO (1992) concluye que las variables que mejor explican las variaciones del volumen de madera libre de nudos son el diámetro a la altura de pecho, el diámetro del cilindro con defectos y la conicidad o ahusamiento de la troza.

El diámetro de la troza es manejable a través de los tratamientos silviculturales aplicados (edad en que se realice la poda, raleos, longitud de la rotación, etc.) y es cuantificable fácilmente a través de mediciones directas. La eficiencia de conversión también es un parámetro conocido y mensurable.

Tanto en DSM como la curvatura del fuste pueden medirse al momento de la poda y a la edad de cosecha respectivamente, pero existe poco conocimiento en el desarrollo de la oclusión de los nudos (PARK, 1982), lo cual implica que para conocer el DCD deba recurrirse a estimaciones para su predicción.

Como principales usos que se les da a la madera libre de nudos pueden distinguirse los productos de madera sólida, tales como muebles carpinterías, molduras y otros. Además del mercado de las chapas para fines decorativos.

Según McKENZIE (1999) para el 2005 se estima que la cantidad de materia podada disponible tanto en Chile como en Nueva Zelanda llegará a unos 2,5 millones de m³, en contraste con la demanda de Estados Unidos y Asia por la madera libre de nudos llegaría alrededor de los 20 millones de m³.

2.1.6. Metodologías usadas actualmente para la predicción del DCD

Numerosos trabajos se han realizado con el objetivo de conocer el DCD a partir de parámetros conocidos. PARK (1982) desarrolló regresiones estadísticas en las cuales ocupa como principal predictor del DCD el DSM, encontrando valores de $R^2 = 0,88$. Estas relaciones las estableció con datos obtenidos a través de mediciones directas que fueron hechas a partir del aserrío de trozas de *Pinus radiata* (D. Don), pero por condiciones del estudio los resultados estaban limitados a trozas rectas.

GOSNELL (1987), basándose en los estudios hechos por PARK (1982) incorporó el efecto de la curvatura del fuste en la predicción del DCD, agregando a la anterior relación un nuevo parámetro, la máxima desviación de la troza elevada al cuadrado, obteniendo $R^2 = 0,74$.

En Chile OLIVARES **et al** (1985) propusieron sistemas de predicción del DCD basado en regresiones estadísticas, las cuales eran de dos tipos, el primero en que explicaba el DCD a partir del diámetro máximo sobre muñón (DMSM) más el efecto de la profundidad de oclusión, pero éstas tuvieron bajos índices de asociación entre variables. La segunda forma es predecir el DCD a partir del DMSM, aquí se encontró R^2 de hasta 0.96, con lo cual se obtienen estimaciones aceptables. El método utilizado fue la medición directa de las variables explicatorias mediante el debobinado sistemático de la troza.

El efecto de la curvatura de la troza fue incluido en los estudios de OLIVARES y MENESES (1992), encontrando relaciones del tipo $DCD = f(DMSM)$ y $DCD = f(DSO)$, ésta última con un $R^2 = 0,92$.

2.2. Generalidades sobre Metodología Ultrasónica

2.2.1. Definiciones

Básicamente el movimiento ondulatorio está relacionado estrechamente con el fenómeno de las vibraciones, las cuales son producidas a partir de un impulso, por lo cual consideraremos una onda a *el movimiento de una perturbación*, que no se debe confundir con el movimiento de las partículas (SERWAY, 1993). Entendiéndose entonces que todas las ondas transportan energía.

Tomando como medio de propagación una sustancia material, se habla entonces de ondas mecánicas. Básicamente una onda mecánica se caracteriza por requerir las siguientes condiciones:

- i. alguna fuente que produzca la perturbación
- ii. un medio que se pueda perturbar
- iii. una conexión o mecanismo físico por medio del cual los puntos adyacentes del medio puedan interactuar unos con otros.

Existen tres conceptos físicos importantes para caracterizar una onda:

Longitud de onda: es la distancia mínima entre dos puntos de una onda que se comportan igualmente

Frecuencia: es la rapidez con la que se repite la perturbación

Velocidad de la Onda: es la rapidez con que se propaga una onda y que depende directamente de las propiedades del medio.

Según el movimiento de las partículas las ondas se clasifican en:

Ondas longitudinales: cuando el movimiento de la partícula es paralelo a la dirección de propagación.

Ondas transversales: cuando el movimiento de las partículas del medio perturbado es perpendicular a la dirección de propagación.

Las ondas sonoras son ondas longitudinales que resultan de la perturbación del medio, esta corresponde a una serie de regiones de alta y baja presión, que viajan a través del aire o cualquier otro medio material.

Dependiendo del rango de frecuencia de las ondas mecánicas longitudinales existen tres tipos:

- i. **Ondas Audibles:** ondas sonoras que caen dentro del rango de sensibilidad del oído humano.
- ii. **Ondas Infrasonicas:** ondas longitudinales con frecuencia bajo el rango audible.
- iii. **Ondas Ultrasónicas:** ondas longitudinales de frecuencia por sobre el rango audible.

Se entiende por ultrasonido a una vibración de las partículas materiales cuya frecuencia es superior al umbral de la audición humana (16 a 20 Khz). La propagación de éstas es por medio de ondas mecánicas, las cuales producen una vibración de las partículas del material en la misma dirección de la propagación de la onda.

Para la generación de ondas ultrasónicas se ocupan por lo general los métodos fundados en la variación de las dimensiones de un sólido al someterlo a un campo eléctrico o magnético, fenómenos los cuales se conocen como electrostricción y magnetostricción respectivamente. Esto se realiza por lo general ocupando sólidos dieléctricos, como los cristales piezoeléctricos, los cuales por la aplicación de energía eléctrica la transforman en energía mecánica, fenómeno conocido como *efecto piezoeléctrico inverso*, y la conversión contraria se denomina *efecto piezoeléctrico directo*.

Los cristales que presentan el efecto piezoeléctrico son los que les falta el centro de simetría y entre ellos destacan el cuarzo, la sal de Rochelle (la de mayor efecto piezoeléctrico), el titanato de bario, el sulfato de litio, etc. (ALMAGRO, 1967).

Se conocen como transductores a los dispositivos construidos con el objetivo de emitir y recibir una onda que se propaga en otro medio. Cada transductor tiene una frecuencia propia y un tipo de onda emitida característica, las cuales son determinadas según el material de construcción utilizado para dicho dispositivo.

Cada vez que un rayo ultrasónico al propagarse pasa de un medio a otro de diferente impedancia acústica, parte de él es reflejada y la otra es transmitida, dependiendo la relación de estas de las impedancias de ambos medios. Por todo lo anterior para la propagación en forma correcta desde el transductor al sólido debe existir un contacto directo o en su defecto un medio de acople, diferente al aire, que maximice la energía transmitida. Como medios de acople usualmente se utilizan gel acuoso, glicerina, aceite, agua, etc. Sin descartar medios específicos desarrollados por entidades comerciales.

2.2.2. Propagación de las Ondas Ultrasónicas en la madera

La base para la evaluación no destructiva de las propiedades elásticas de la madera es la medición de la velocidad de propagación de las ondas en dicho material (BUCUR, 1985), con lo cual logra una caracterización de la madera, pero también es de mucha importancia la medición de la atenuación de la onda, en especial para la detección de anomalías internas del material.

En general, la velocidad de propagación de las ondas (V) a través de un material isotrópico depende de los siguientes parámetros: módulo de elasticidad del material (E) y la densidad (ρ) de éste, obedeciendo a la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Como la madera es un material poroso higroscópico, de propiedades anisotrópicas, para su caracterización se adopta como un material ortotrópico, es decir, con tres ejes principales ortogonales: longitudinal (paralelo a las fibras), radial y tangencial (con respecto a los anillos de crecimiento), por lo cual la madera presenta tres módulos de elasticidad (E_L , E_R , E_T), tres módulos de rigidez (G_{LR} , G_{RT} , G_{LT}) y seis razones de Poisson (μ_{LR} , μ_{RT} , μ_{LT} , μ_{RL} , μ_{TR} , μ_{TL}). Para el cálculo de éstas constantes se debe determinar la matriz rigidez $[C]$, lo cual es posible mediante la velocidad ultrasónica o bien otros métodos estáticos.

La ecuación de Christoffel relaciona la velocidad de propagación de la onda con la densidad del medio y sus propiedades elásticas, como a continuación se observa:

$$[C_{ijkl} n_i n_j - \rho \delta_{ik} V^2] U_k = 0$$

Donde:

C_{ijkl} = Tensor Rigidez

ρ = Densidad del medio

δ_{ik} = Delta de Kronecker

U_k = Vector desplazamiento

n_i, n_j = Componentes del vector de desplazamiento unitario

Resolviendo la ecuación de Christoffel para la propagación de ondas a lo largo de los tres ejes de simetría de un sólido ortotrópico, nos entrega para cada eje, tres tipos de ondas: una longitudinal y dos transversales, las que pueden escribirse, en términos generales como:

$$C_{ii} = V_{ii}^2 \rho$$

Los que corresponden a los seis términos de la diagonal de la matriz rigidez y las tres componentes fuera de la diagonal que pueden ser calculadas usando la ecuación:

$$C_{ij} = \Gamma_{ij} / n_k n_i - C_{ii}$$

Donde:

$$\Gamma_{ij} = C_{ijkl} n_i n_j ; \text{ Tensor de Christoffel}$$

Dejando además de manifiesto que la velocidad para el caso de los sólidos de simetría ortotrópica varía según las tres direcciones principales.

Es importante hacer notar que tanto E , μ , como además ρ y V dependen del contenido de humedad del material en estudio.

2.2.3. Estudios relacionados con la madera

Existen diversos estudios que utilizan el ultrasonido para determinar las propiedades elásticas y detectar defectos internos de la madera, entre ellos destacan los realizados por BUCUR (1984, 1995), donde estudia la anisotropía de la madera estableciendo la metodología de cálculo para la determinación de las constantes elásticas para la misma. BUCUR (1995) describe algunos trabajos de aplicación del ultrasonido para la detección de singularidades en la madera.

Para la clasificación de la madera según sus propiedades elásticas SANDOZ (1989) ensayo en vigas de madera estructural mediante la propagación de ondas longitudinales aplicadas en el sentido longitudinal de la pieza, obteniendo los mejores resultados para la estimación del módulo de elasticidad a partir de la velocidad ultrasónica medida, por lo cual este parámetro se podría considerar para la clasificación de las maderas. SANDOZ (1993) extiende su estudio e incluye el efecto del contenido de humedad y la temperatura en la clasificación basada en el ultrasonido, incorporando ambas variables como correctores para la clasificación de trozas, en condiciones verdes y de temperatura variable.

Es posible encontrar también el desarrollo de un scanner acústico-ultrasónico para la evaluación no destructiva de la madera y de madera laminada, mediante la propagación de ondas ultrasónicas y midiendo la atenuación de éstas para determinar propiedades elásticas de la madera (BEALL et al, 1993).

ROSS (1991) utilizó ondas de esfuerzo longitudinales para determinar el módulo elástico de madera verde y así entregar un parámetro para la clasificación de productos de madera.

Otro parámetro estudiado para la caracterización de la madera es la atenuación de la onda, es decir, la disminución de la amplitud de la onda al atravesar el medio de prueba, BUCUR (1995) establece que es la base para el estudio de las propiedades viscoelásticas de la madera.

KARSULOVIC Y LEÓN (1994), a través de la aplicación de ondas de esfuerzo longitudinales, generadas mediante pulso acústico, permite predecir en piezas el número, ubicación y tamaño de los nudos, estudiando las reflexiones de las ondas propagadas.

En nuestro país destacan las investigaciones realizadas por KARSULOVIC, GAETE Y LEÓN (1998), quienes en el marco del proyecto FONDECYT N° 1960419 desarrollan el estudio de la anisotropía de la madera de pino radiata, además de la detección de defectos internos en ésta apoyándose en la técnica ultrasónica.

Los mismos autores anteriores (2000) estudiaron la influencia de los nudos en la variación de los tiempos de propagación de las ondas ultrasónicas, ensayando en piezas de 40 x 125 x 400 mm que contenían un nudo pasante, piezas obtenidas por corte floreado. Realizaron una ultrasonografía en que se distinguió claramente el nudo y su zona de influencia.

3. MATERIALES Y MÉTODO

3.1. MATERIALES

3.1.1. Material de ensayo

Para la realización de este trabajo se utilizaron 2 trozas de *Pinus radiata* (D. Don), provenientes de dos árboles de plantaciones ubicadas en la Novena Región y que son propiedad de Forestal Arauco S.A. Las trozas utilizadas en éste estudio tienen las siguientes características:

- Longitud de 5,5 m.
- Diámetros de 44 y 48 cm.
- Número de verticilos por troza: 4 y 5.

De estas trozas se obtuvieron rodela correspondientes a las zonas de verticilo y de interverticilo, las primeras para los ensayos morfológicos y ultrasónicos en madera con nudos, las segundas para la determinación de las propiedades físicas del material y su caracterización ultrasónica.

3.1.2. Equipos utilizados

i. Obtención de rodela:

- Motosierra
- pintura al aceite y polietileno, con el objetivo de sellar cada rodela.

ii. Obtención y procesamiento de las probetas:

- Sierra huincha y sierra circular, perteneciente al Centro Tecnológico de la Facultad de Ciencias Forestales.
- Horno de secado (Figura N° 3)
- Balanza de precisión 0,01 gr. (Figura N° 4)
- Vaso precipitado 500 cc
- Accesorios de laboratorio



Figura N° 3: Horno de secado



Figura N° 4: Balanza y equipo de laboratorio

iii. Ensayos ultrasónicos:

- Generador de ultrasonido marca Panametrics Ultrasonic Pulser/ Receiver Modelo 5058PR. (Figura N° 5)
- Osciloscopio marca Metrix Analogue/digital modelo OX 8620. (Figura N° 5)
- Transductores Panametrics de 500 Khz (Figura N° 6) y 100 Khz
- Equipo detector de fallas Panametrics EPOX III (Figura N° 7)
- Medios de acople SWC Panametrics, Gel de ecografías médicas.
- Equipo de ecografía médica marca ATL HDI 3000 Ultrasound System.
- PC con procesador Pentium III y 120 Mb RAM. (Figura N° 7)

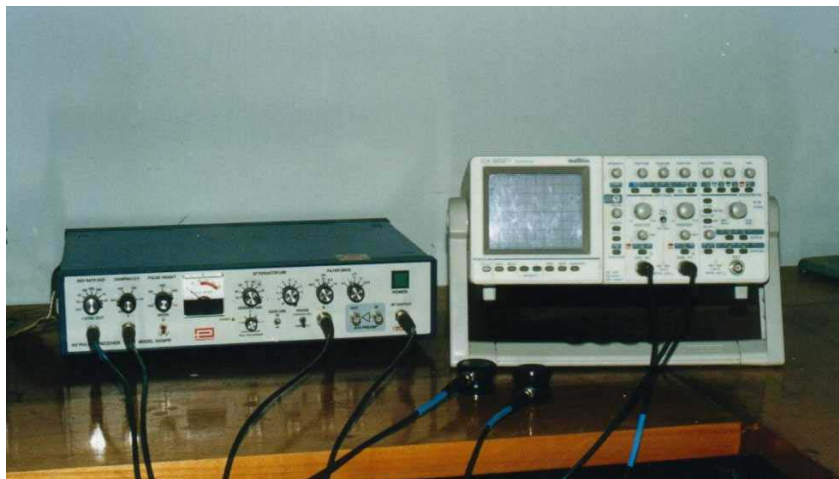


Figura N° 5: Generador de pulsos y osciloscopio



Figura N° 6: Transductores 500 Khz



Figura N° 7: Detector de fallas y PC

3.2. MÉTODO

3.2.1. Obtención del material de ensayo

3.2.1.1. Obtención de rodela: (Figura N° 8)

A lo largo de las trozas de pino radiata, se estableció visualmente la ubicación de los diferentes verticilos y se procedió a cortar rodela de aproximadamente 25 cm. de espesor, poniendo especial cuidado en que el corte abarcara la totalidad de las cicatrices dejadas por las ramas. Además se procedió al corte de rodela perteneciente a los internudos de aproximadamente 20 cm. de espesor, las cuales fueron marcadas y extraídas de la zona que se encuentra equidistante entre dos verticilos consecutivos. A cada una de las rodela se las rotuló indicando su posición relativa en la troza (longitudinal y diametral).

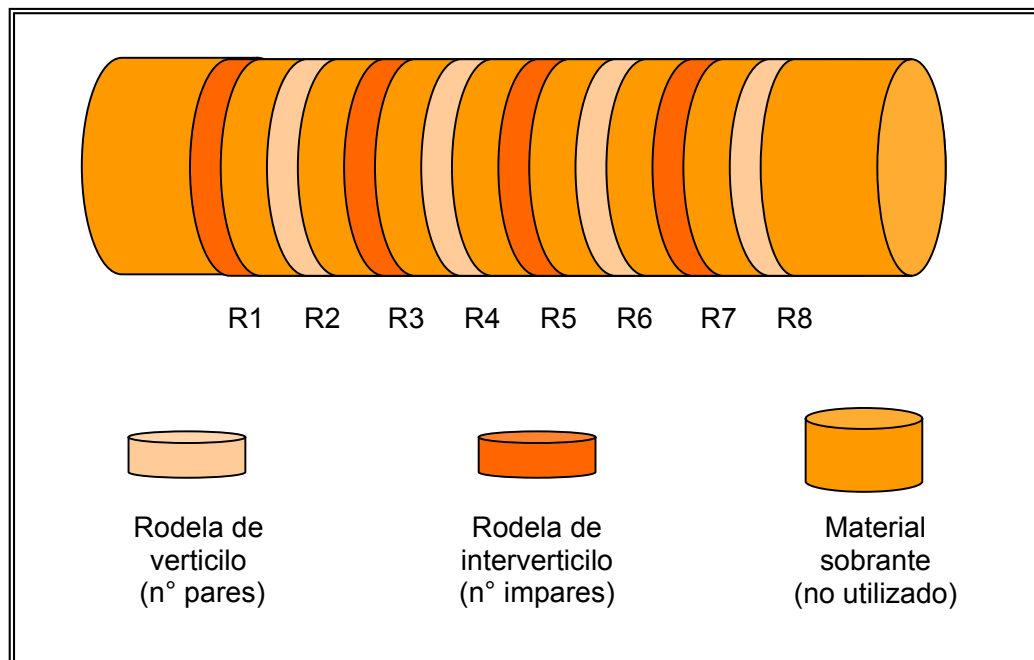


Figura N° 8: Esquema de corte de rodela

Las rodela fueron pintadas en las caras transversales y posteriormente se las envolvió y selló con polietileno transparente, ambos procedimientos con el objetivo de minimizar la pérdida de humedad y de esta forma mantener en lo posible las condiciones verdes del individuo durante el periodo de transporte y de almacenamiento de las rodela, hasta el momento en que se procesaron.

3.2.1.2. Obtención probetas: (Figura N° 9)

A dos de las rodela (A y B) correspondiente a la zona de interverticilo le fueron rebajados sus espesores a través del corte transversal de sus caras mediante el uso de la motosierra, con el objetivo de eliminar las caras pintadas y así dejarlas de un espesor apto para el procesamiento mediante sierra circular. Posteriormente mediante nuevos cortes se obtuvieron dos viguetas perpendiculares, rotuladas como X e Y, de las siguientes dimensiones, 50 x 50 x diámetro rodela (mm), abarcando su longitud completa e incluyendo la médula. Ambas muestras fueron sometidas a ensayos preliminares de propagación de ondas ultrasónicas, utilizando para este objetivo los transductores de 500 y 100 KHz.

Posteriormente de cada una de las viguetas se obtuvieron probetas por sucesivos cortes transversales, de las siguientes dimensiones 50 x 50 x 20 mm y se utilizaron para los siguientes análisis:

- contenido de humedad
- densidad básica
- densidad verde
- propagación ultrasónica, probando los transductores de 500 y 100 KHz.

Con el objetivo de determinar las densidades, el volumen se obtuvo mediante desplazamiento de agua y el peso por medición directa.

Una vez recopilada toda la información se obtuvo las gradientes que experimentan cada uno de los parámetros en forma diametral y una referencia de la variación de estos a lo largo de la troza, información la cual se utilizó para la realización de gráficos y sus respectivas comparaciones.

Además de este modo se seleccionó el transductor que mejor se adecuó a las condiciones de la madera en ensayo.

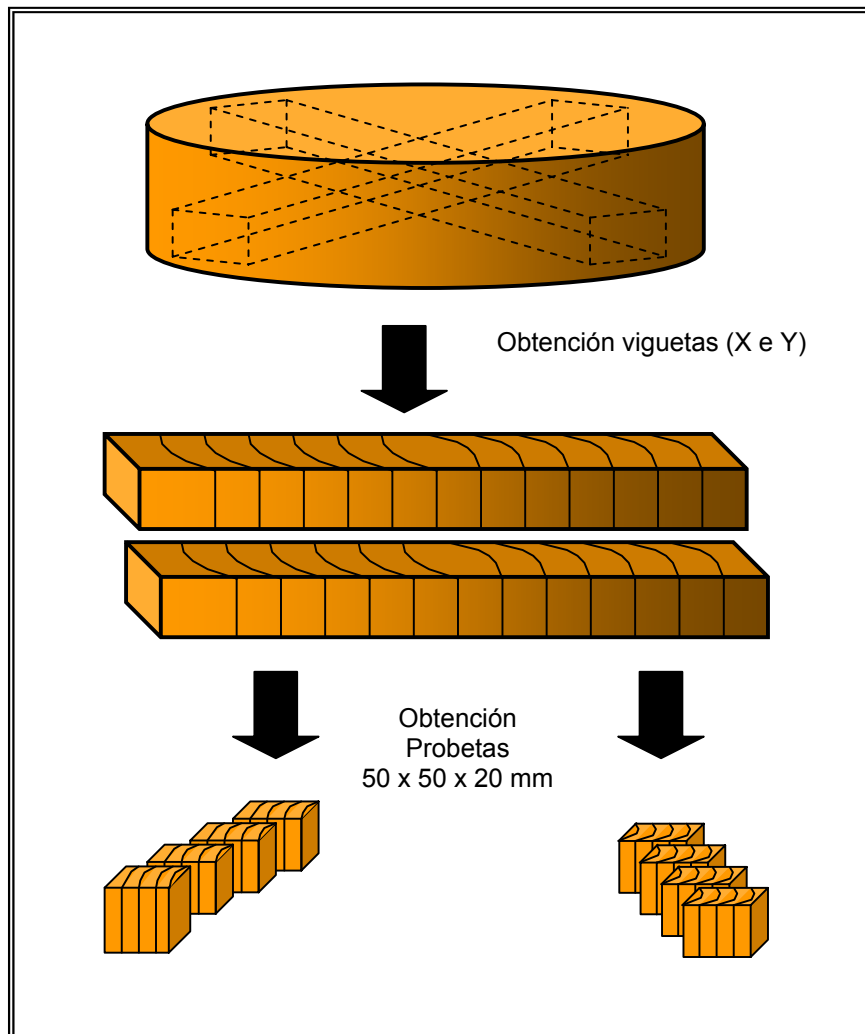


Figura N° 9: Obtención de las probetas

3.2.2. Estudio morfológico de la singularidad

A partir de dos rodajas conteniendo verticilos (D y C), una de cada árbol, se realizaron cortes radiales y longitudinales, específicamente en la zona de la cicatriz de la rama y fueron medidos los siguientes parámetros: ángulo de inserción de la rama (θ), diámetro, longitud y profundidad de oclusión (Figura N° 10).

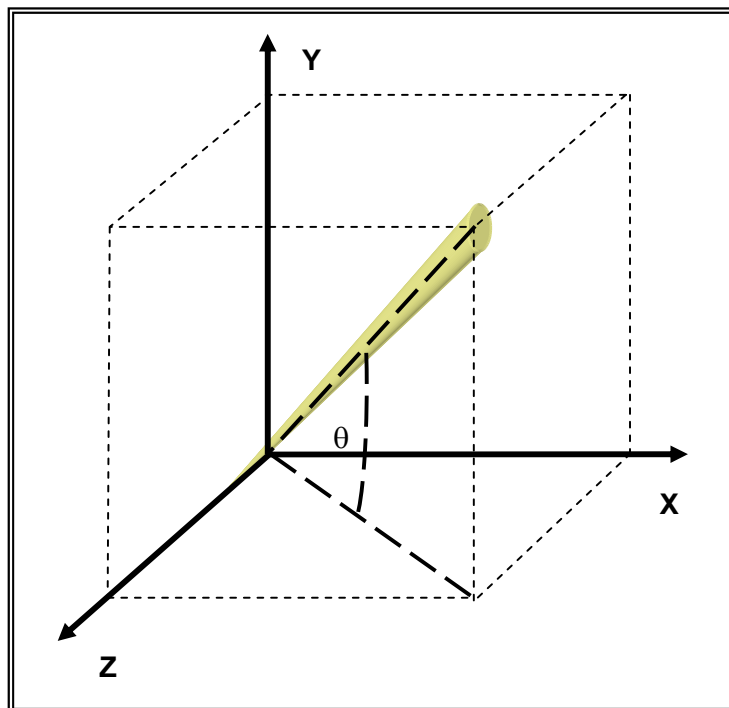


Figura N° 10: Disposición espacial de un nudo

3.2.3. Ensayos ultrasónicos en madera libre de nudos

Dos de las rodajas correspondiente a interverticilos fueron utilizadas para ensayos de propagación de ondas ultrasónicas. Se descortezaron cada una de estas y se les realizó sucesivos cortes tangenciales, con el objetivo de obtener un octágono. En estos últimos se realizaron mediciones de tiempos y de atenuación de las ondas ultrasónicas a través de los cuatro ejes de propagación normales a cada par de caras paralelas.

Los pulsos de propagación son leídos en el osciloscopio, fijando el pico del pulso inicial como línea base, luego se coloca el material de ensayo entre los transductores y se determina el tiempo midiendo la distancia entre el pico inicial (línea de base) y el primer pico en presencia de la probeta. Posteriormente se determina la longitud de la pieza ensayada y con esto calcula la velocidad de propagación.

3.2.4. Detección del cilindro central defectuoso

Para la detección del cilindro central defectuoso se utilizaron la totalidad de las rodela provenientes de ambas trozas que contenían verticilos a excepción de las utilizadas en los estudios morfológicos de la singularidad. Todas éstas se procesaron del mismo modo que las rodela de interverticilos, se puso especial cuidado en los cortes de las zonas donde se encuentran las cicatrices de las ramas, por corresponder al lugar donde la singularidad se encontraba expuesta al frente de la onda.

A continuación se realizó por métodos de propagación y de eco-reflejado los ensayos tendientes a determinar el tamaño del cilindro nudoso central, midiéndose la atenuación y los tiempos de propagación de las ondas ultrasónicas. Las lecturas se efectuaron en todo el largo de la rodela, y el número en cada cara dependió del diámetro del transductor utilizado, repitiéndose la metodología para las cuatro trayectorias de propagación. (Figura N° 11)

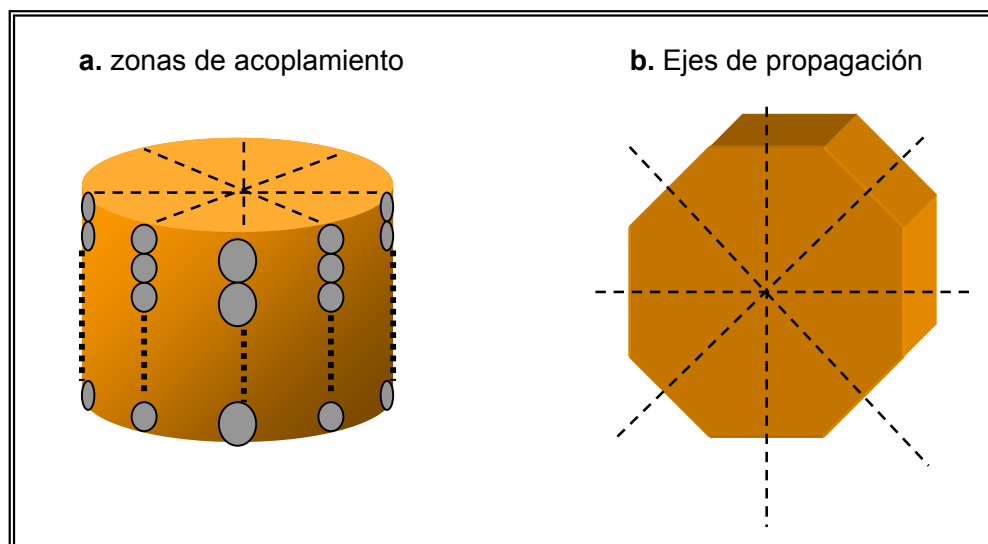


Figura N° 11: Metodología de propagación ultrasónica

3.2.5. Posicionamiento de nudos en probetas cúbicas

A partir de dos rodela, una de cada árbol, se seleccionaron las caras que presentaban las cicatrices de poda más notorias, y mediante cortes en dirección paralela al eje central se obtuvieron cubos en que se encontraba ubicada la singularidad por completo, para eso se extrajeron los cubos de 13 x 13 x 13 cm. (Figura N° 12)

A continuación se trazó una malla de puntos a una distancia de 7 x 7 mm, formando ejes coordenados (Figura N° 13), y en cada intersección se procedió a una lectura de tiempos de propagación de ondas ultrasónicas en las tres direcciones de la probeta es decir, radial, longitudinal y tangencial (Figura N° 14). Con esta información se pudo obtener un imagen correspondiente a las variaciones de la velocidad en cada punto.

Además estos mismos cubos y a modo de ensayo se les sometió a una prueba con un ecógrafo medico.

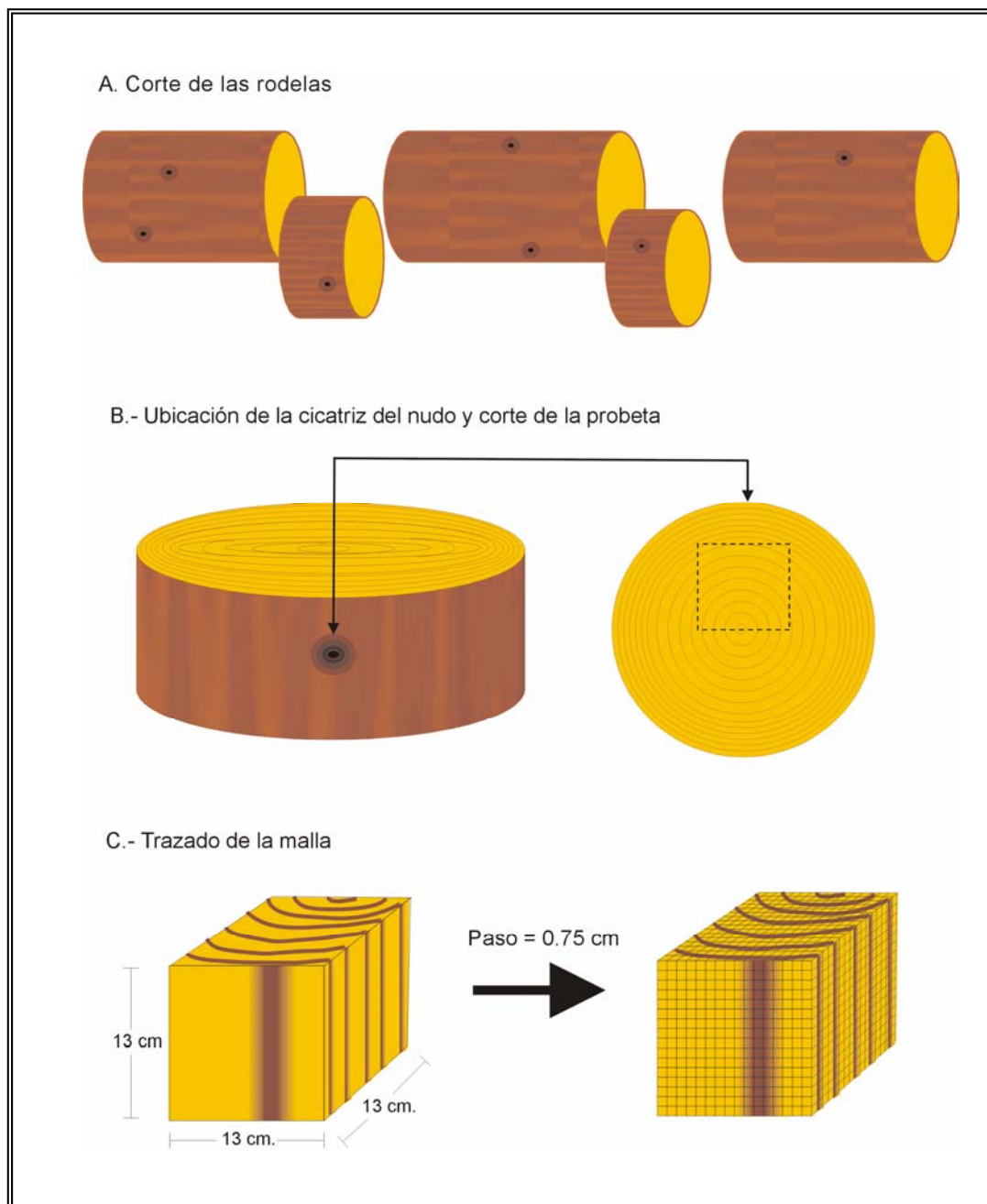


Figura N° 12: Esquema del proceso de obtención de las probetas cúbicas

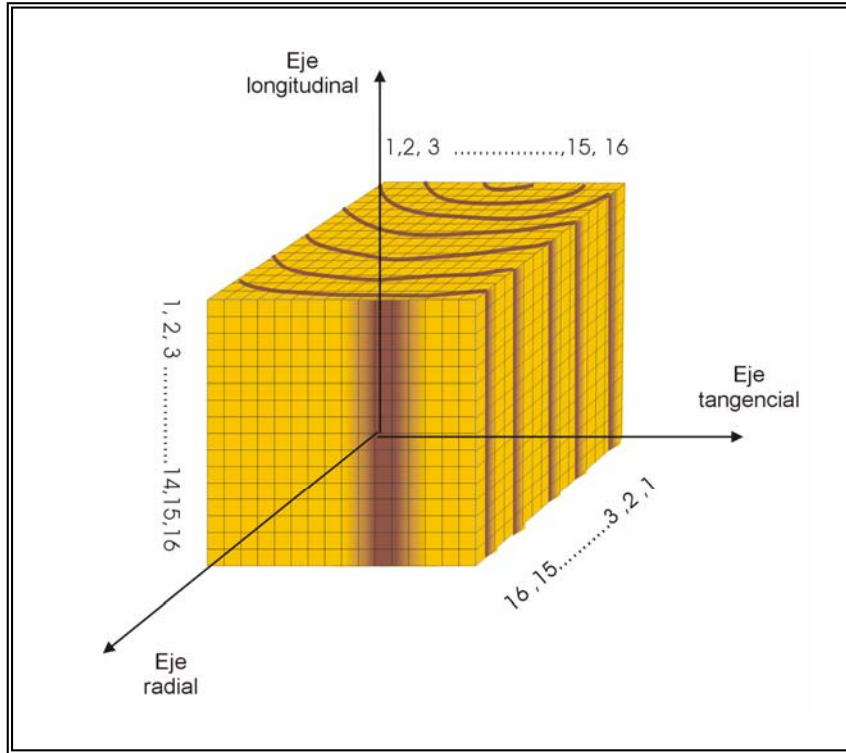


Figura N° 13: Esquema de la ubicación de las coordenadas en la probeta cúbica

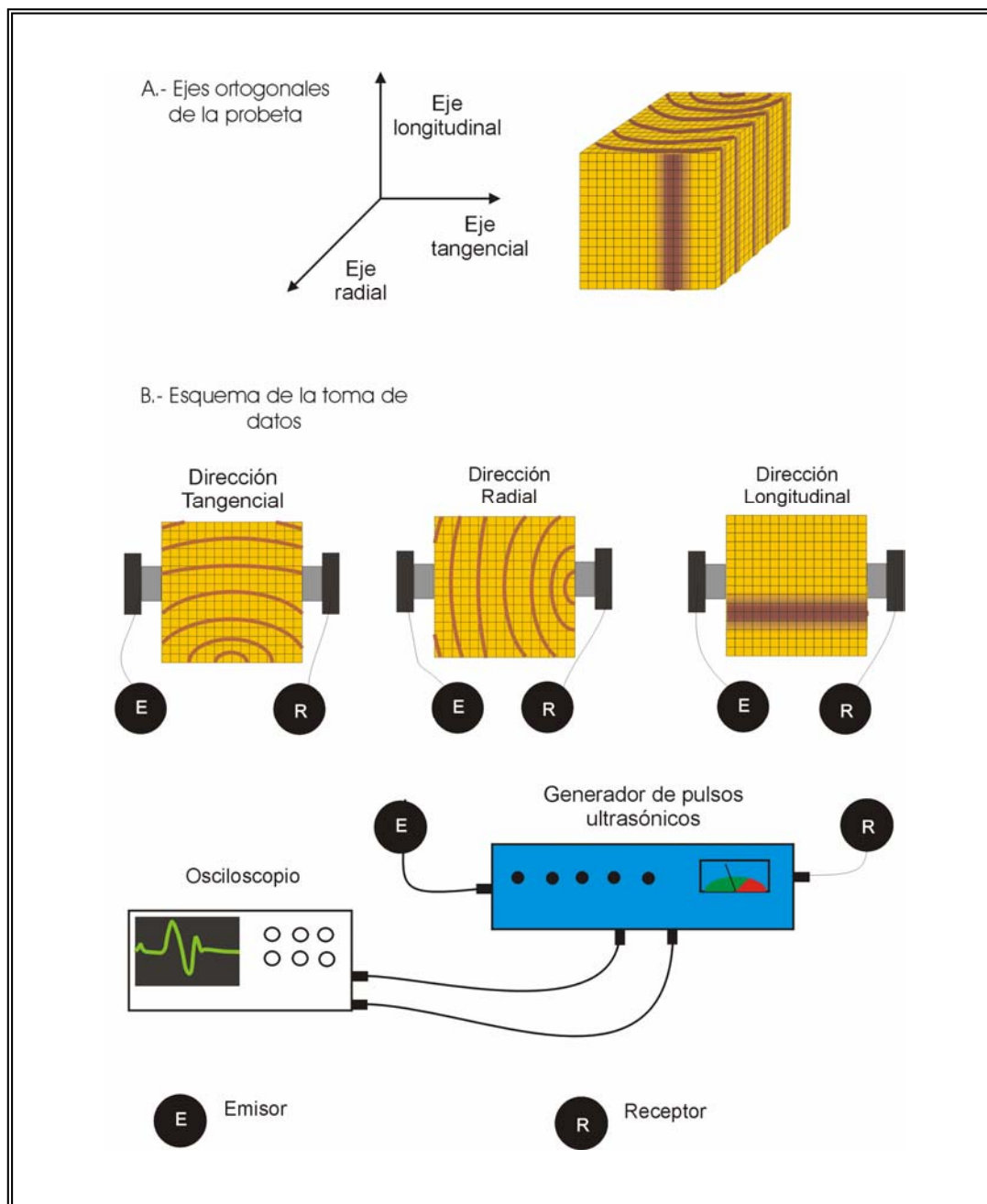


Figura N° 14: Esquema de la medición de tiempos de propagación en probeta cúbica

4. RESULTADOS y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de las características físicas del material

Los resultados obtenidos para las rodela A y B, y sus respectivos ejes ortogonales X e Y, son entregados en las Tablas N° 1 a la N° 4 (ANEXOS) respectivamente. Además se graficó para cada rodela y para cada eje obteniendo los siguientes resultados (Figuras N° 15, 16, 17 y 18).

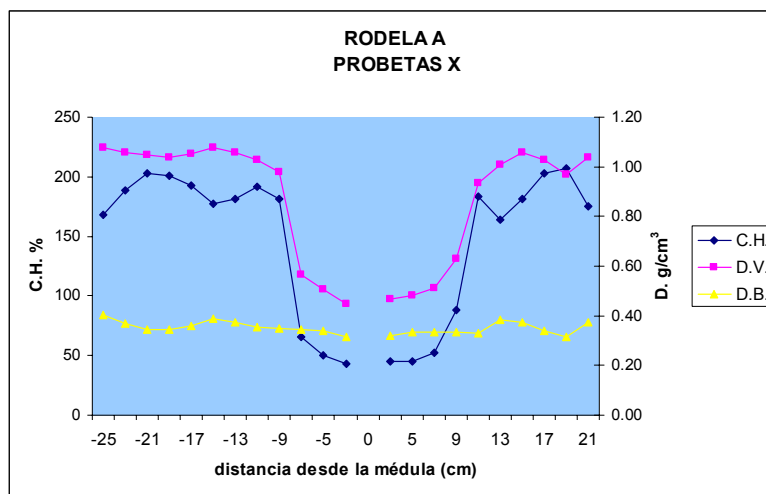


Figura N° 15: Distribución diametral de CH, DV y DB.

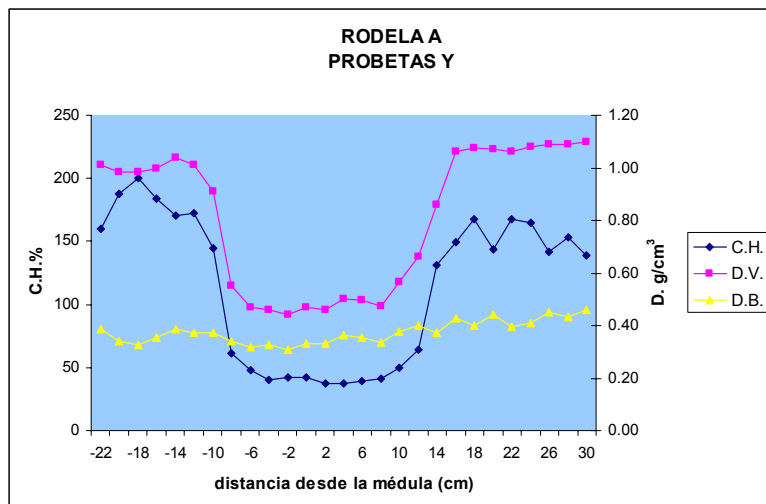


Figura N° 16: Distribución diametral de CH, DV y DB.

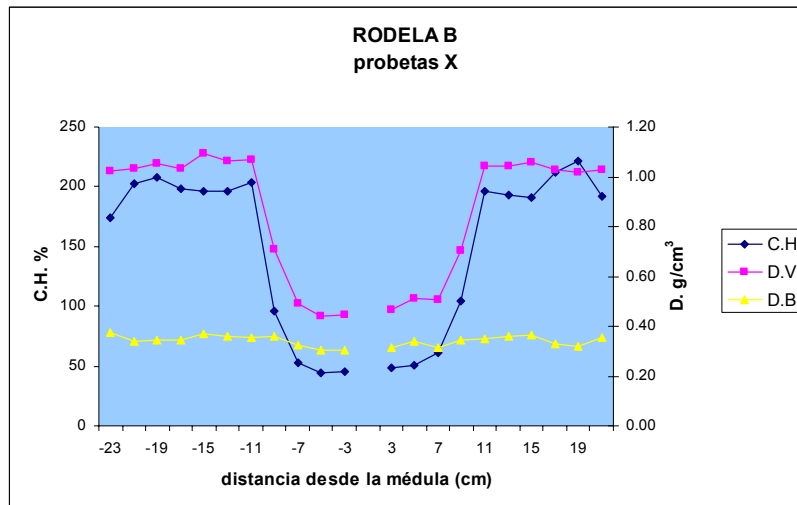


Figura N° 17: Distribución diametral de CH, DV y DB.

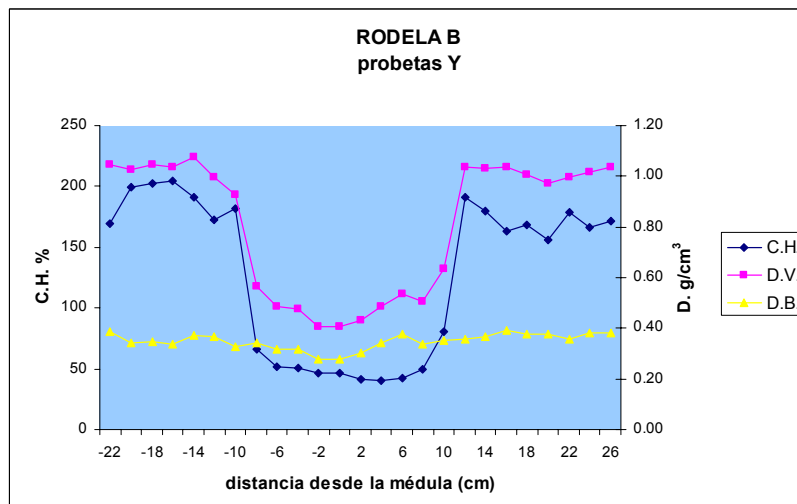


Figura N° 18: Distribución diametral de CH, DV y DB.

Se observa una clara tendencia tanto para el contenido de humedad, así como la densidad verde, de acuerdo a su variación radial.

Tanto en la rodela A y B se observa un comportamiento similar para la variación del contenido de humedad (CH) y la densidad verde (DV). En ambos casos la distribución radial que presentan es en forma de una "U", con valores mínimos mientras más cercanos se encuentra el punto de la médula, aumentando en forma progresiva hacia el exterior. Los valores presentan una gran variación, con coeficientes de variación superiores al 30%.

Es notable también en ambos casos la existencia de una zona, al centro, con valores de CH y DV muy distintos al exterior, que para la rodela A en el dirección X (Figura N° 15) va desde -7 a 9 cm. desde la médula, en el dirección Y (Figura N° 16) de -8 a 12 cm. desde la médula. En este sector los CH son muy bajos con respecto a la periferia, promediando un valor de 50.7 %, y con una DV media de 0.51 g/cm³. Mientras que en la zona externa los promedios de CH y DV son 173.9 % y 1.03 g/cm³ respectivamente. Para la rodela B (Figuras N° 17 y 18) la zona central abarca en dirección X de -9 a 7 cm. y en dirección Y de -8 a 10, con valores de CH y DV promedios de 54.3% y 0.50 g/cm³ respectivamente. Las medias de CH y DV para la zona de la periferia son de 186% y 1.02 g/cm³ respectivamente.

La explicación que se le atribuye a esta distribución radial de CH y DV es debido a que en el centro se encuentra la zona de madera juvenil, caracterizada por poseer la mayoría de las células muertas sin citoplasma, y en la periferia se encuentran más cercano a los tejidos conductores, en que existe gran cantidad de fluidos desplazándose.

La distribución radial de la densidad básica (DB) permanece más o menos constante, (C.V. 6.8 y 11 %) en ambas rodela, con una media de 0,36 g/cm³ para la rodela A, y de 0,355 g/cm³ para la rodela B. Esto se explica a que por definición la DB nos muestra la relación entre el peso seco y el volumen verde de una muestra, y esta relación se mantiene constante por lo general en individuos de crecimiento rápido y constante, en que no existe en mayor medida el fenómeno de duraminización, como los en este caso en particular en la muestra, debido a que el peso seco de los tejidos es muy similar a lo largo de la gradiente radial.

4.2. Resultados propagación ultrasónica

4.2.1 Lecturas obtenidas en viguetas

Las lecturas están expresadas en las Tablas N° 5 a la N° 12 de los ANEXOS. Estas fueron obtenidas en la medición de la velocidad de propagación ultrasónica en las viguetas correspondientes a la rodela A y B. Los resultados corresponden tanto a las lecturas en dirección tangencial como longitudinal., para cada una de las frecuencias utilizadas.

En las Tabla N° 21 de los anexos se entrega un resumen estadístico.

Los gráficos siguientes (Figuras N° 19 a la N° 50) muestran la dispersión de las lecturas, sobre la cual se calculó una línea de tendencia, mostrando la ecuación y su R² correspondiente.

Para la caracterización de las viguetas se midió la atenuación y la velocidad de propagación.

Como primer paso se midió la atenuación de onda, lo cual presentó diversas dificultades, como fue la variabilidad extrema de las lecturas en un mismo punto debido a la presión ejercida de contacto entre el transductor y el material, la cantidad y el medio de acople utilizado, además del tiempo que se demoró en efectuar la medición. Estas tres fueron las principales dificultades encontradas, que al variar no presentaron un comportamiento claro que se pudiese relacionar con los cambios de lectura en atenuación de la onda.

Posteriormente se midió la velocidad de transmisión de la onda, obteniéndose lecturas sin mayores inconvenientes, además éstas presentaron un comportamiento independiente de las variables que afectaron a las mediciones de la atenuación, por lo cual se decidió seguir los ensayos utilizando la velocidad de propagación del ultrasonido.

En las viguetas se efectuaron las mediciones en las direcciones tangencial y longitudinal, con ambos transductores (500 y 100 Khz), y los valores que se obtuvieron correspondieron a la variación en la gradiente radial.

A los valores obtenidos se les aplicó una regresión lineal, con el objeto de caracterizar y encontrar alguna relación entre velocidad de transmisión y posición con respecto a la médula.

Para los gráficos de variación radial de estos parámetros los coeficientes de determinación obtenidos tuvieron un máximo de 0.62, (rodela A dirección longitudinal, eje X a 100 Khz (Figura N° 25)), y el valor mínimo que se obtuvo de R^2 fue de 0.0027 (eje Y, dirección longitudinal a 100 Khz (Figura N° 34)). Para la rodela B los valores de R^2 variaron entre un máximo de 0.36, para dirección longitudinal, eje Y, 100 Khz (Figura N° 49), y un mínimo de 0.0002 dirección longitudinal, eje Y, 500 Khz. (Figura N° 48).

Según Espejo (2000), la densidad básica tiene un efecto significativo para la variación de la velocidad de propagación en la dirección longitudinal, debido principalmente a la compactación de las fibras del medio. Además agrega que el efecto del contenido de humedad en la velocidad de propagación sobre el 30%, correspondiente al punto de saturación de las fibras, no es claro, lo que pondría de manifiesto que el agua libre contenida en los lúmenes de las fibras no interviene en las propiedades elásticas de la madera y que el principal efecto, entre la densidad básica y el contenido de humedad, para la propagación de ondas esta dado por el contenido de humedad.

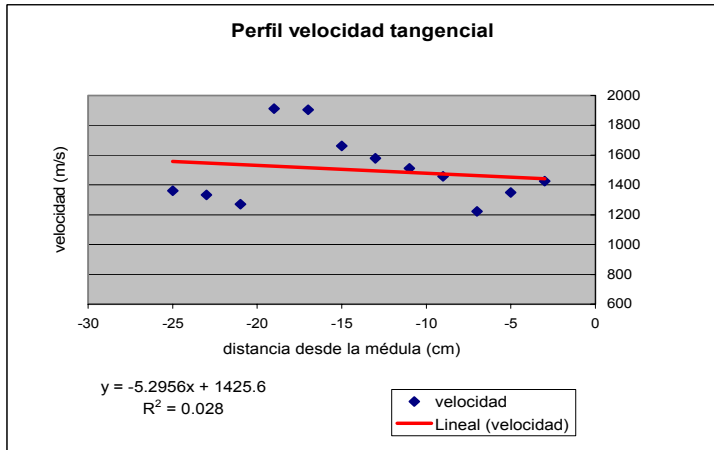


Figura N° 19: Rodela A, eje X (-), 500 Mhz

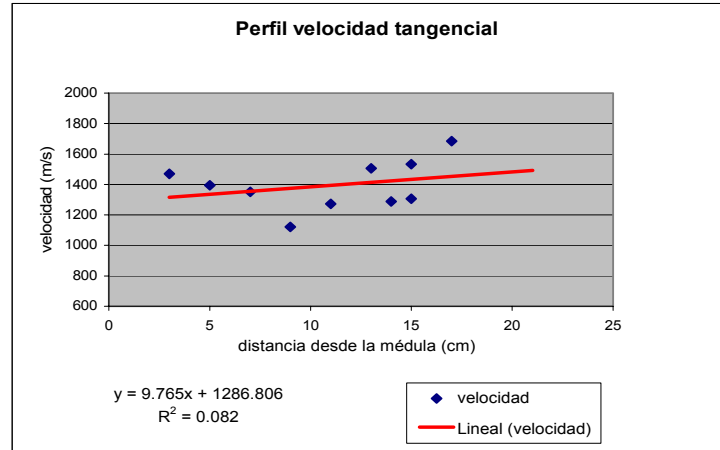


Figura N° 20: Rodela A, eje X (+), 500 Mhz

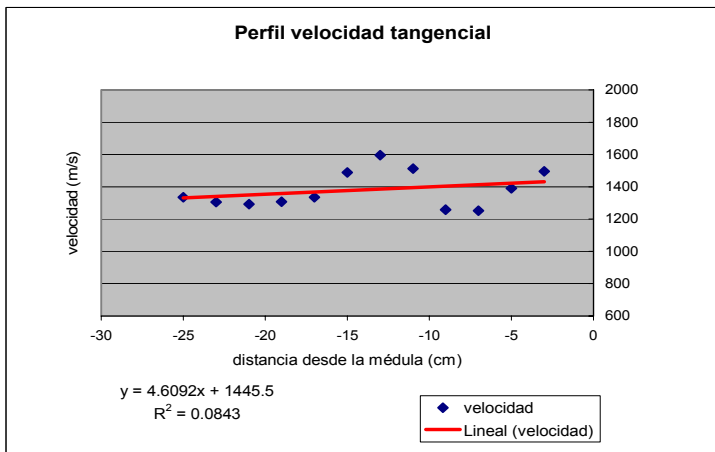


Figura N° 21: Rodela A, eje X (-), 100 Mhz

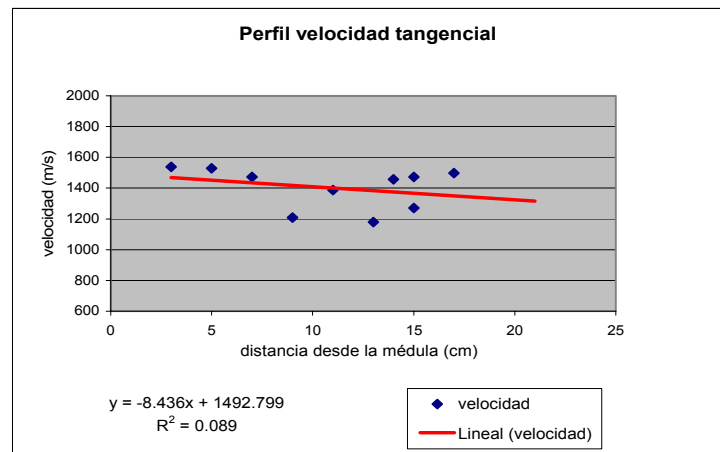


Figura N° 22: Rodela A, eje X (+), 100 Mhz

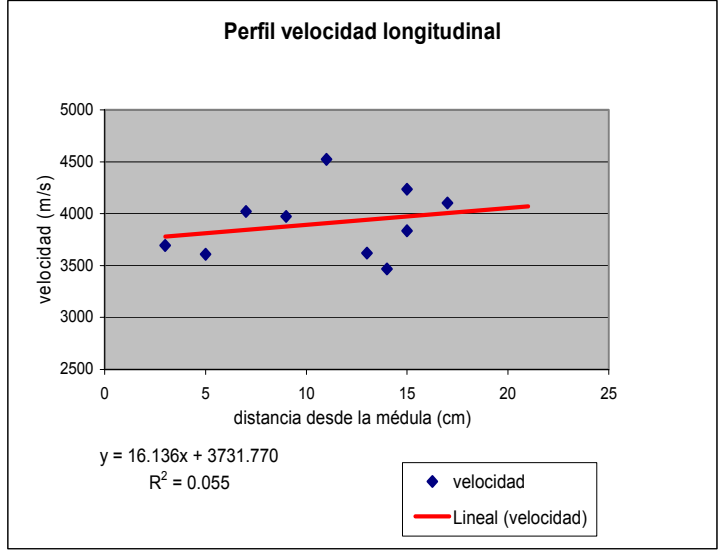
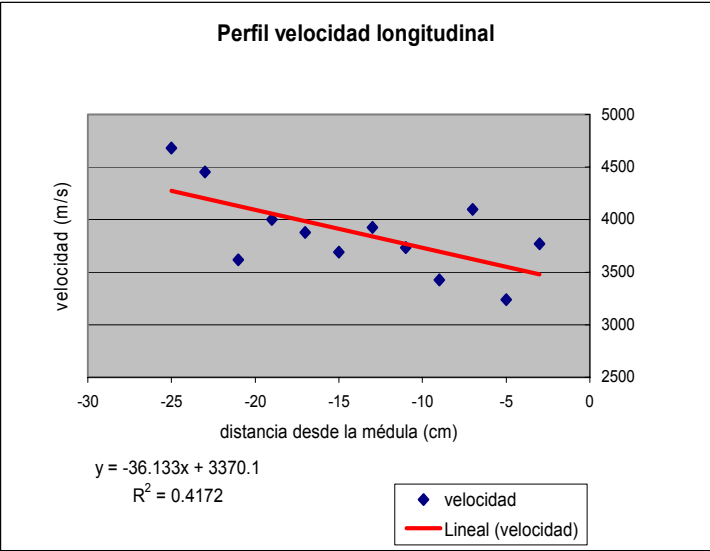


Figura N° 23: Rodela A, eje X (-), 500 Mhz

Figura N° 24: Rodela A, eje X (+), 500 Mhz

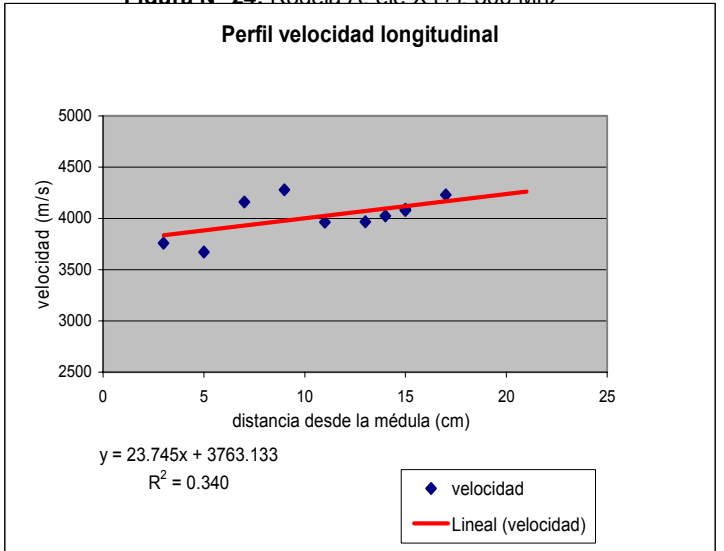
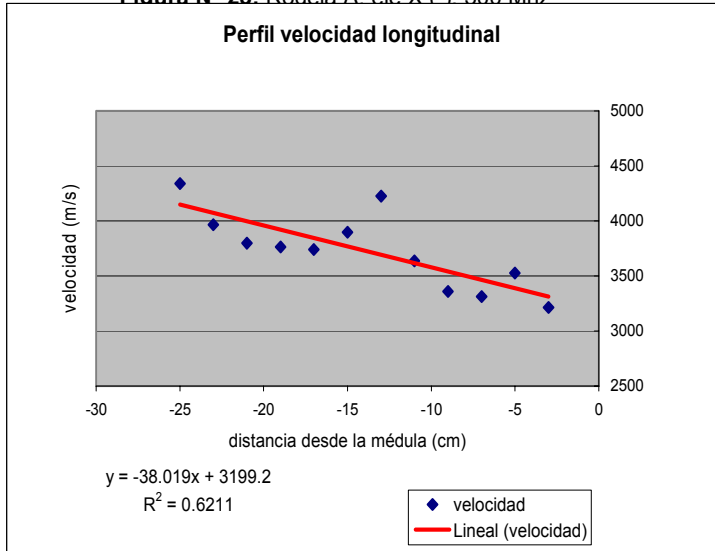


Figura N° 25: Rodela A, eje X (-), 100 Mhz

Figura N° 26: Rodela A, eje X (+), 100 Mhz

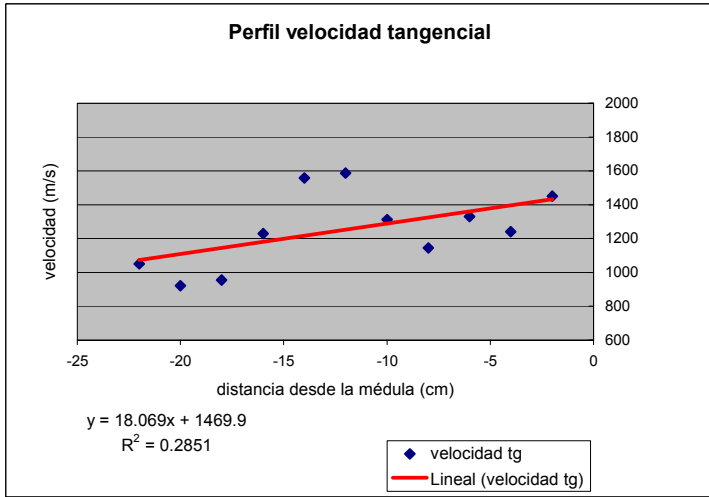


Figura N° 27: Rodela A, eje Y (-), 500 Mhz

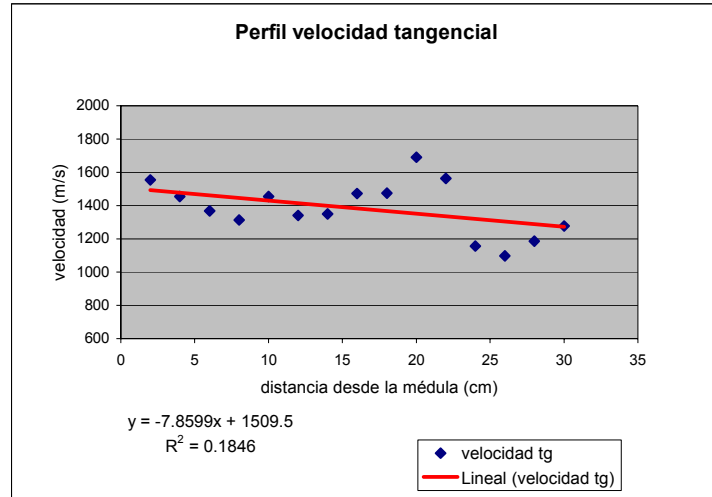


Figura N° 28: Rodela A, eje Y (+), 500 Mhz

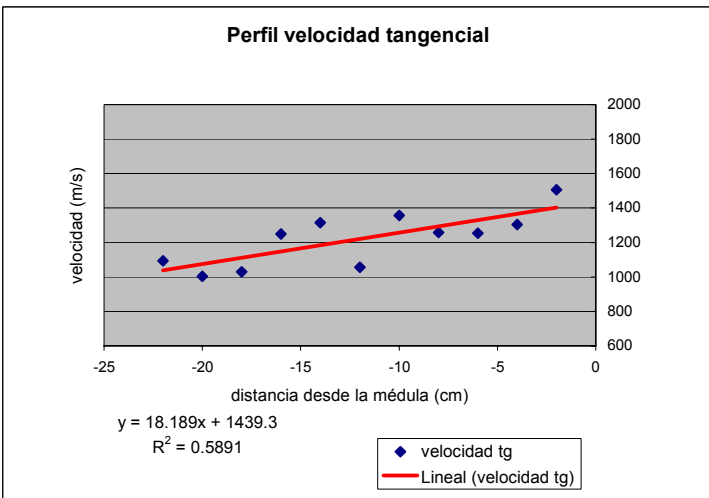


Figura N° 29: Rodela A, eje Y (-), 100 Mhz

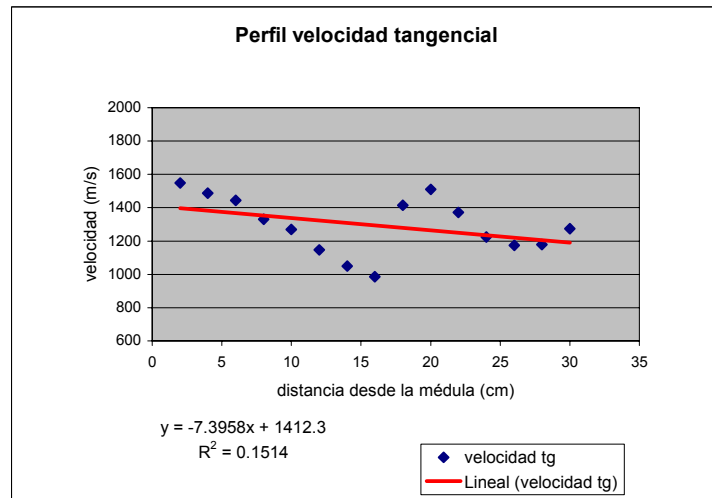


Figura N° 30: Rodela A, eje Y (+), 100 Mhz

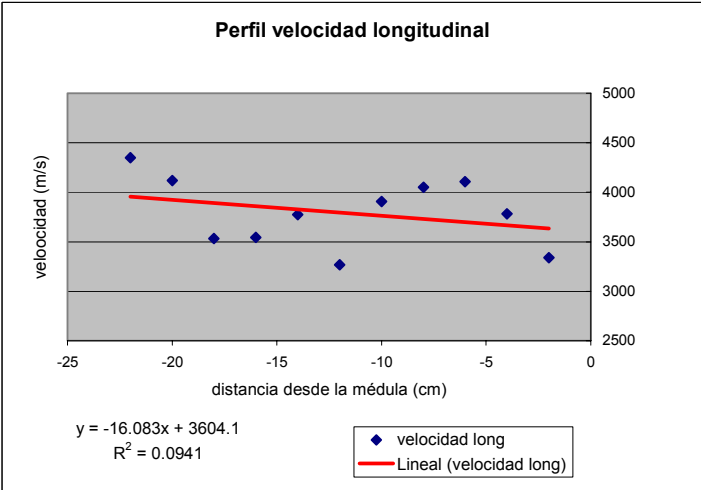


Figura N° 31: Rodela A, eje Y (-), 500 Mhz

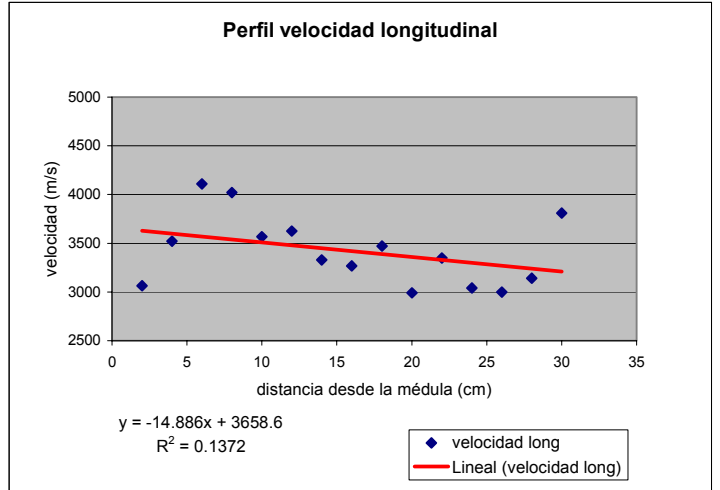


Figura N° 32: Rodela A, eje Y (+), 500 Mhz

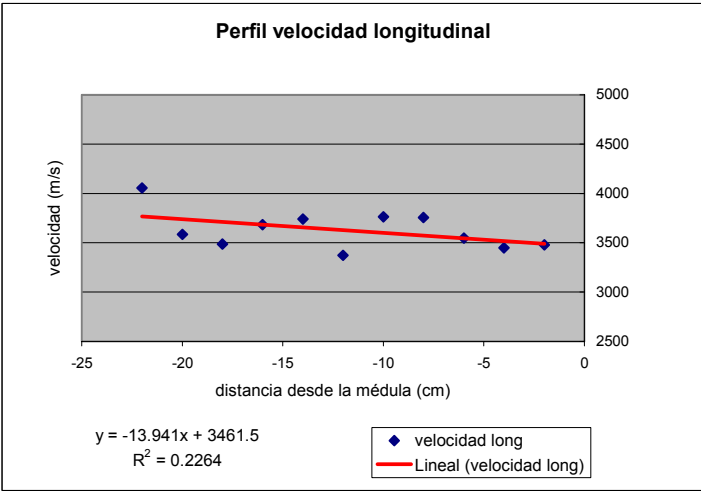


Figura N° 33: Rodela A, eje Y (-), 100 Mhz

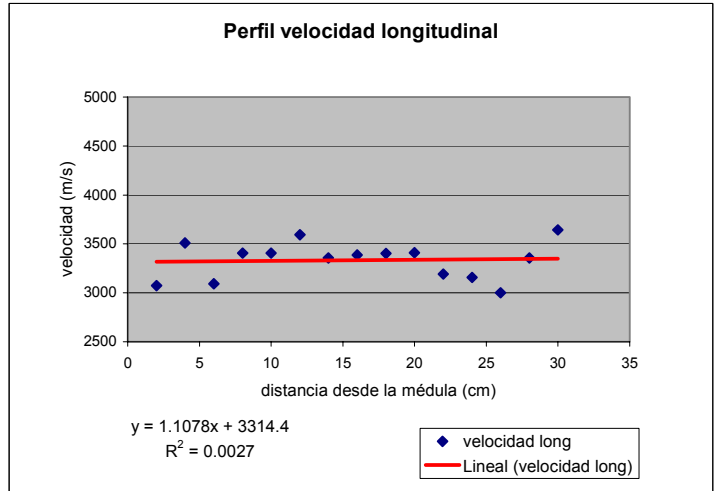


Figura N° 34: Rodela A, eje Y (+), 100 Mhz

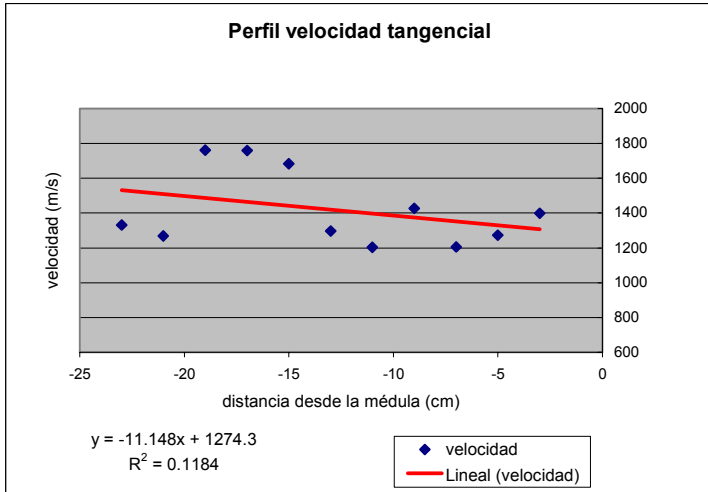


Figura N° 35: Rodela B, eje X (-), 500 Mhz

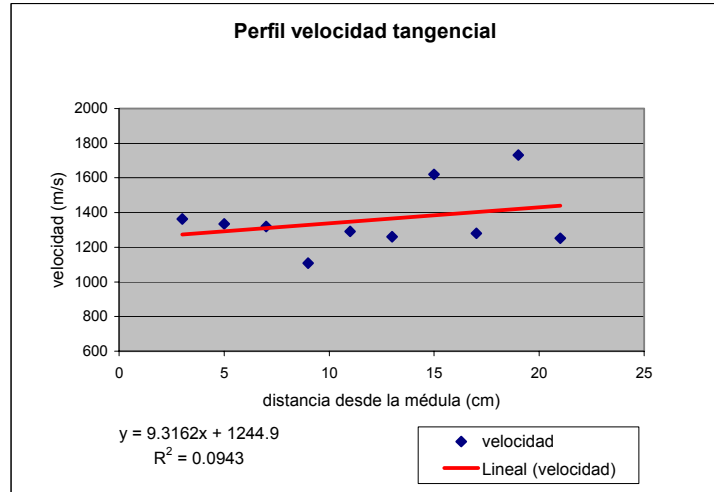


Figura N° 36: Rodela B, eje X (+), 500 Mhz

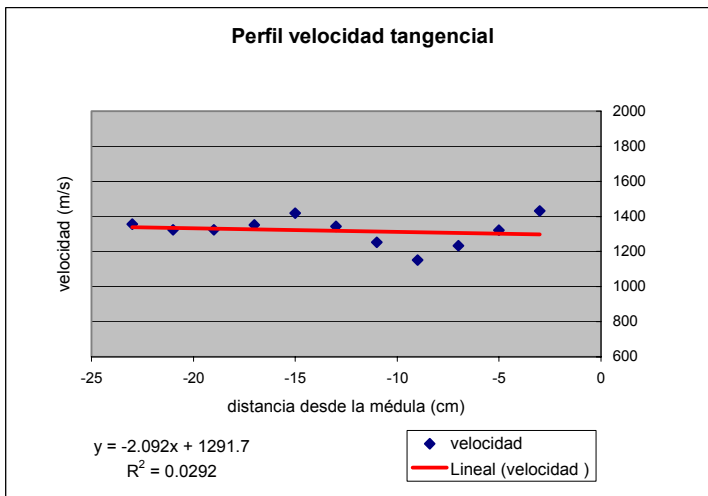


Figura N° 37: Rodela B, eje X (-), 100 Mhz

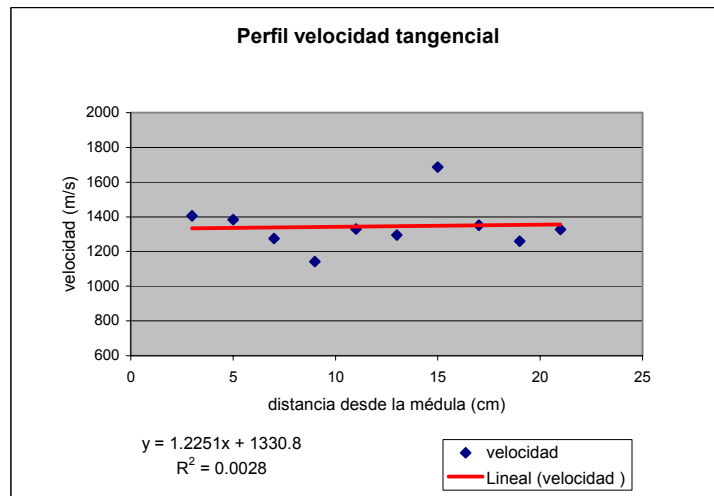


Figura N° 38: Rodela B, eje X (+), 100 Mhz

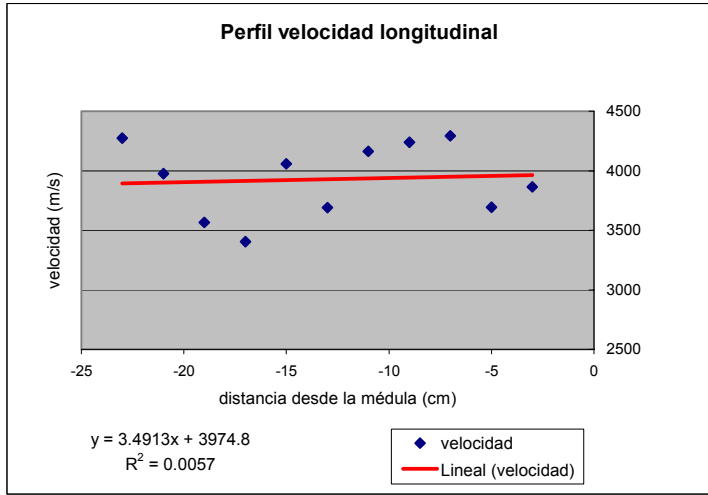


Figura N° 39: Rodela B, eje X (-), 500 Mhz

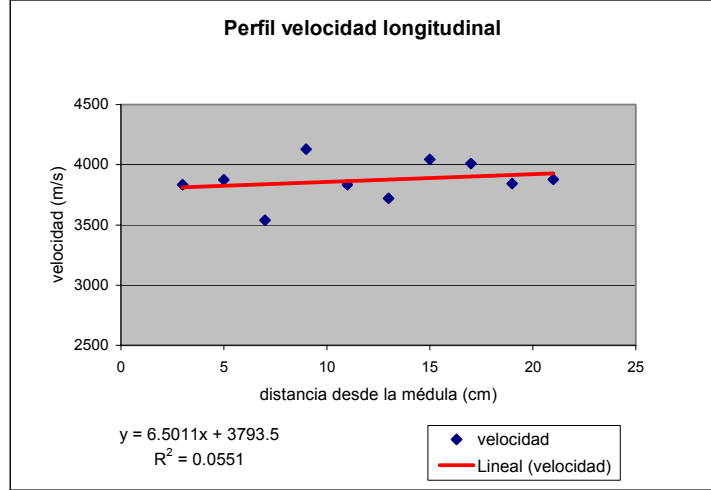


Figura N° 40: Rodela B, eje X (+), 500 Mhz

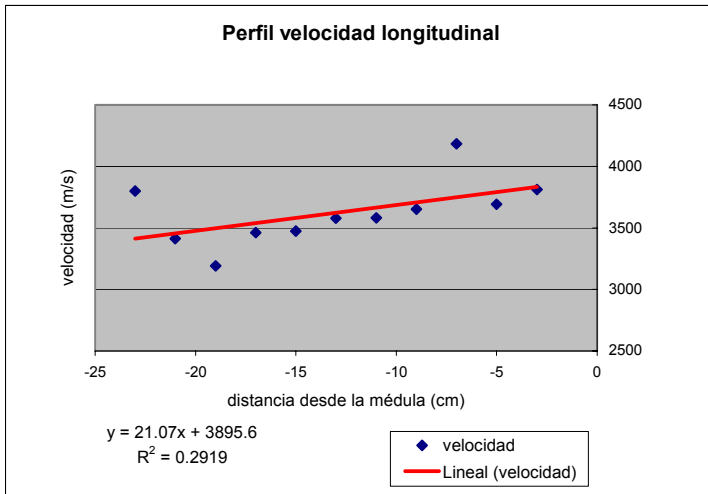


Figura N° 41: Rodela B, eje X (-), 100 Mhz

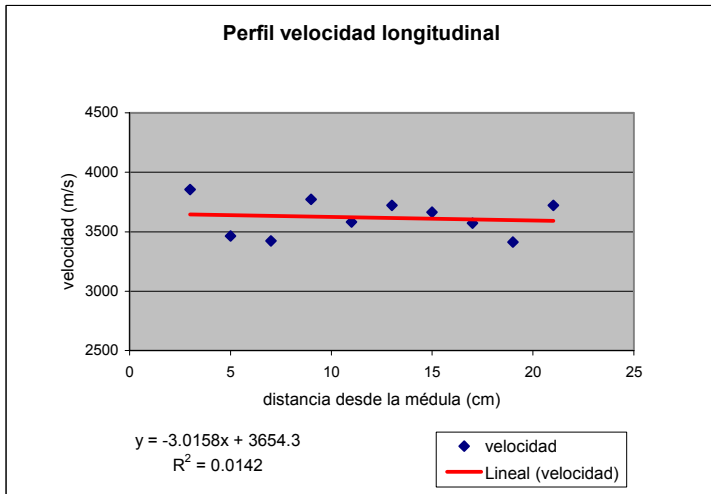


Figura N° 42: Rodela B, eje X (+), 100 Mhz

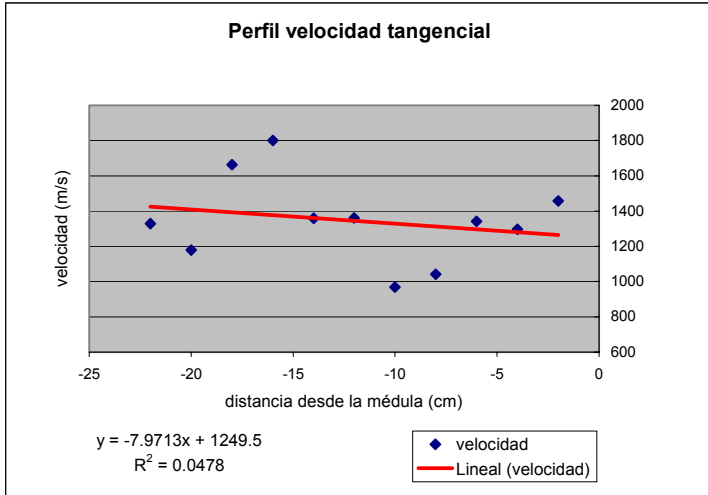


Figura N° 43: Rodela B, eje Y (-), 500 Mhz

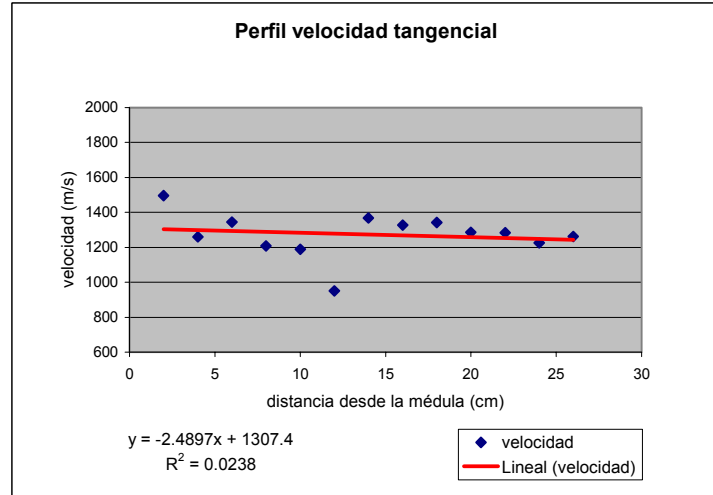


Figura N° 44: Rodela B, eje Y (+), 500 Mhz

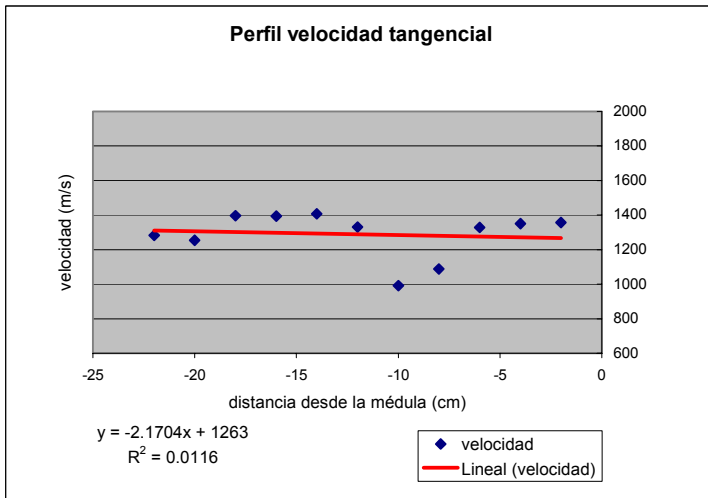


Figura N° 45: Rodela B, eje Y (-), 100 Mhz

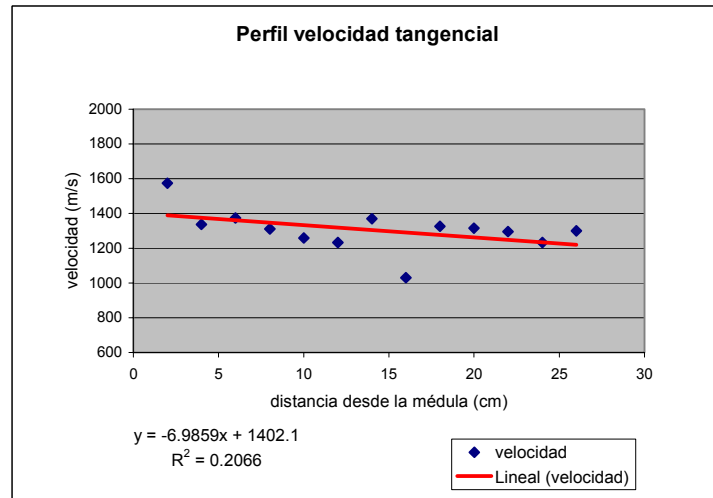


Figura N° 46: Rodela B, eje Y (+), 100 Mhz

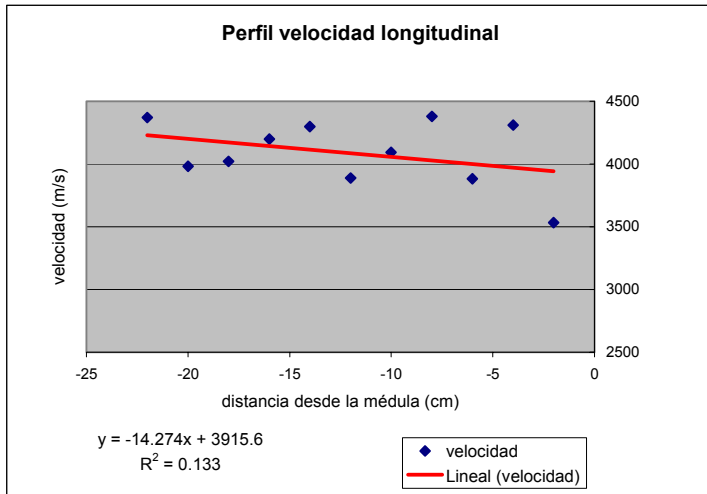


Figura N° 47: Rodela B, eje Y (-), 500 Mhz

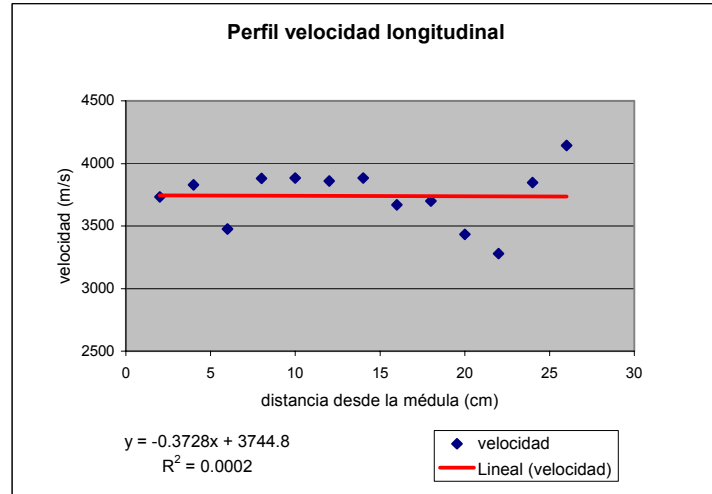


Figura N° 48: Rodela B, eje Y (+), 500 Mhz

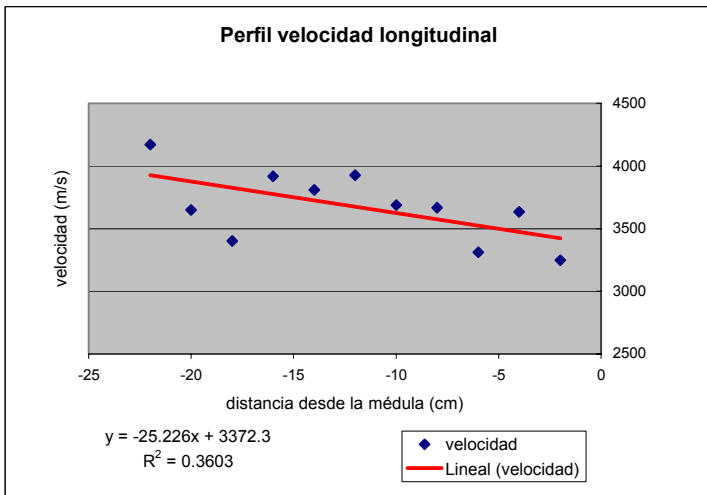


Figura N° 49: Rodela B, eje Y (-), 100 Mhz

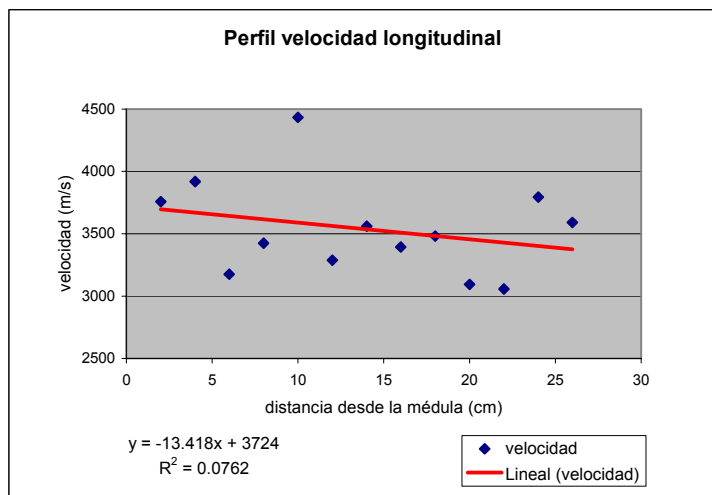


Figura N° 50: Rodela B, eje Y (+), 100 Mhz

4.2.2. Lecturas obtenidas en probetas

Los resultados obtenidos en las probetas se ilustran del mismo modo que los anteriores. Adicionalmente se entrega las lecturas de propagación de la velocidad del ultrasonido en dirección radial. (Tablas N° 13 a la N° 20, ANEXOS).

Adicionalmente se entrega un resumen estadístico en la Tabla N° 22 de los anexos.

En los gráficos realizados también se trazo la línea de tendencia, se muestra su correspondiente ecuación y su R^2 . (Figuras N° 51 a la N° 90).

Para las probetas obtenidas a partir de las viguetas se observó que en los dirección longitudinal y tangencial se obtuvo nuevamente R^2 muy bajos y que poco explicaron la variación de la velocidad según la posición radial de la probeta.

Al efectuar el corte de las viguetas y en probetas fue posible obtener una medición en dirección radial, estos valores se graficaron en variación diametral, para la rodela A (Figuras N° 67 a la N° 70), y para la rodela B (Figuras N° 87 a la N° 90), observándose una distribución de parábola invertida de la velocidad de propagación, con $R^2 \geq 0.5$. siendo esta mayor en ambos casos en las medidas con los 500 Mhz.

El comportamiento de la velocidad radial no quedaría muy en claro, ya que según la bibliografía consultada, sobre el punto de saturación de las fibras la variación en la gradiente diametral que experimenta la velocidad radial del ultrasonido no tendría una relación muy clara.

Además las velocidades medias de propagación que se obtuvieron para los tres ejes principales de la madera obedecieron al comportamiento esperado y de que la mayor velocidad es en la dirección longitudinal, debido principalmente a que existe continuidad de tejido al ser esta la orientación de las fibras. Posteriormente y mucho menor es la velocidad en la dirección radial, y levemente menor a esta es la velocidad en la dirección tangencial. Esta leve diferencia se explica principalmente debido a que en ambas direcciones existe discontinuidad de material, pero en la dirección radial la velocidad es mayor ya que la onda encuentra en las células de los radios leñosos una continuidad de materia, por lo cual se desplaza más rápido.

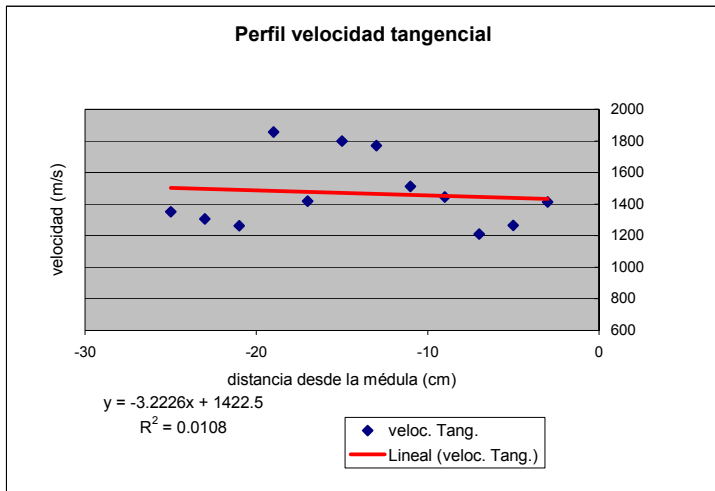


Figura N° 51: Rodela A, eje X (-), 500 Mhz

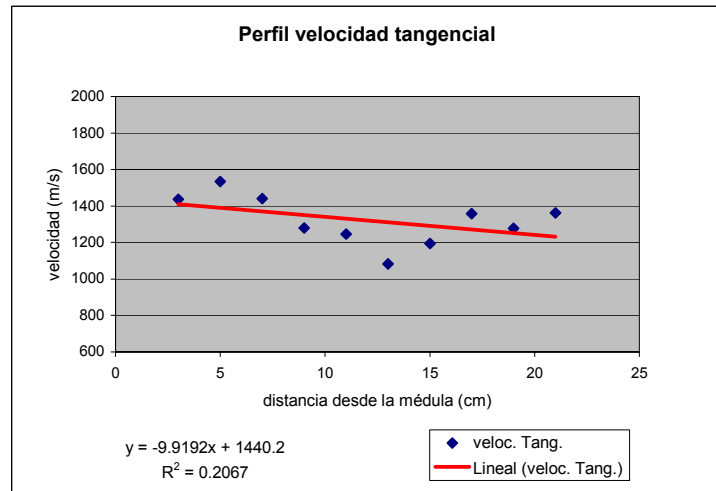


Figura N° 52: Rodela A, eje X (+), 500 Mhz

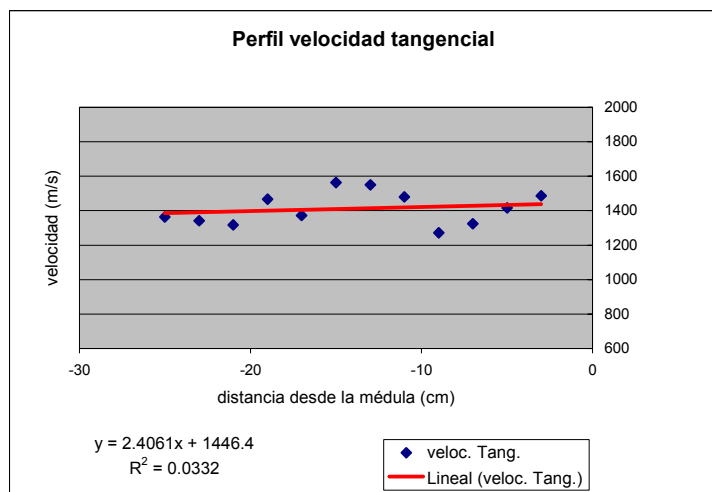


Figura N° 53: Rodela A, eje X (-), 100 Mhz

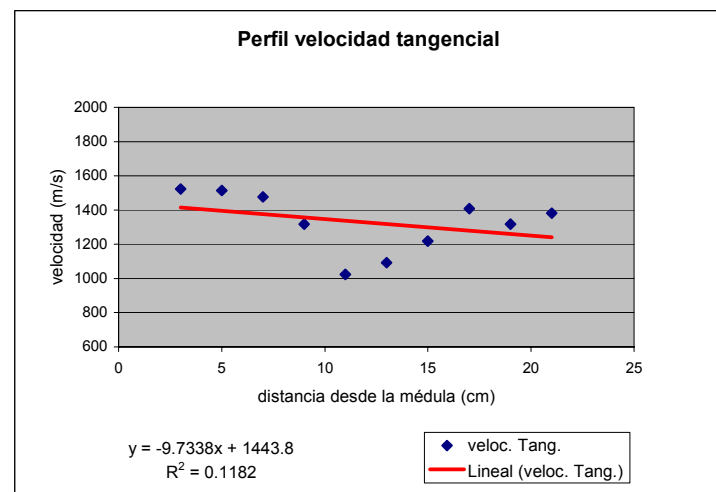


Figura N° 54: Rodela A, eje X (+), 100 Mhz

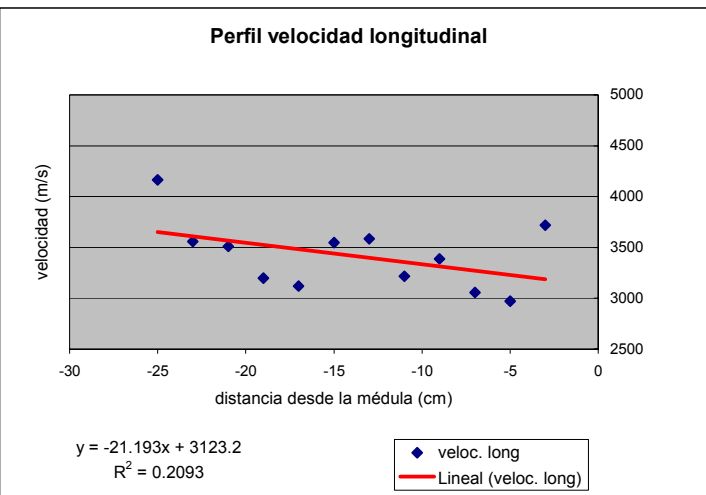


Figura N° 55: Rodela A, eje X (-), 500 Mhz

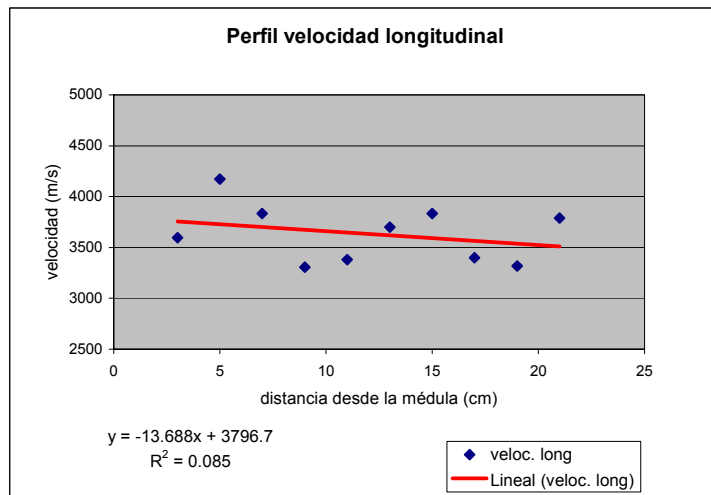


Figura N° 56: Rodela A, eje X (+), 500 Mhz

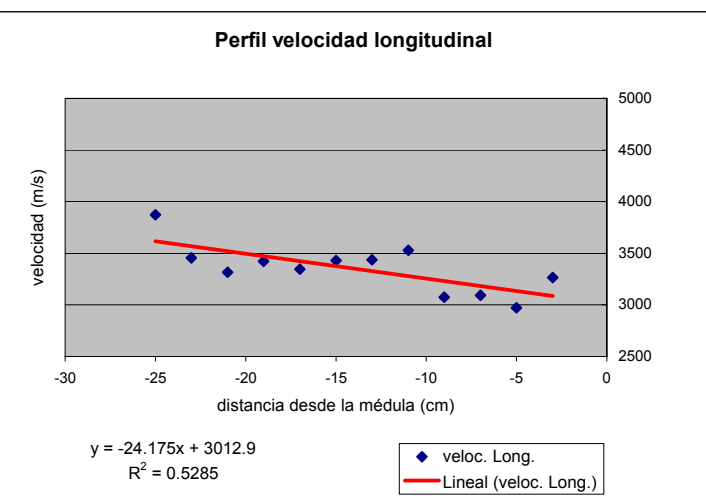


Figura N° 57: Rodela A, eje X (-), 100 Mhz

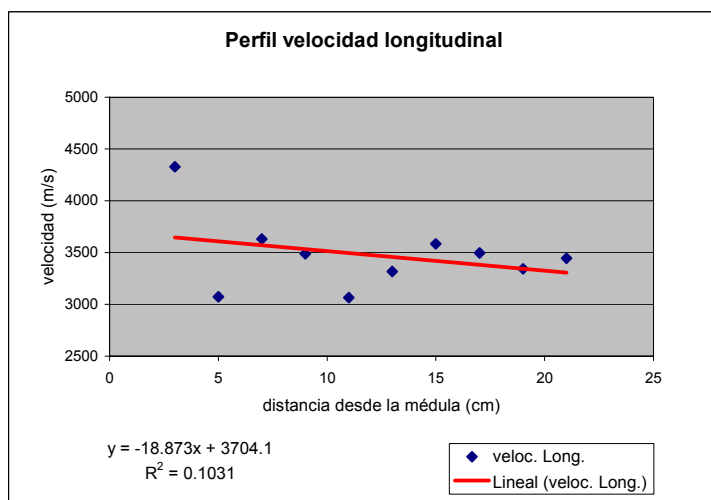


Figura N° 58: Rodela A, eje X (+), 100 Mhz

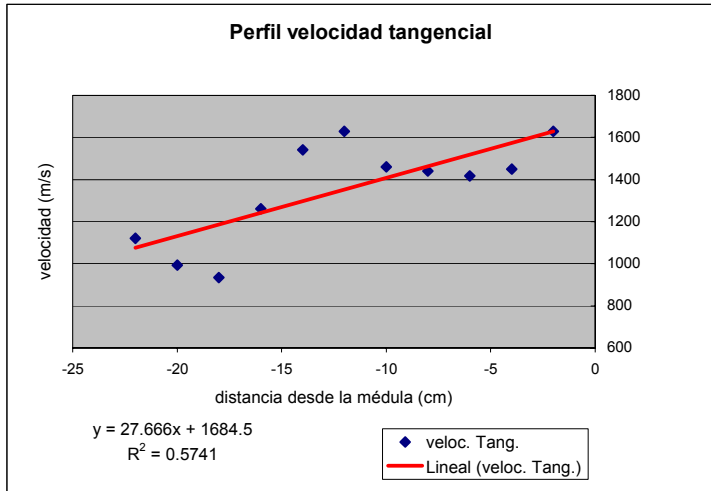


Figura N° 59: Rodela A, eje Y (-), 500 Mhz

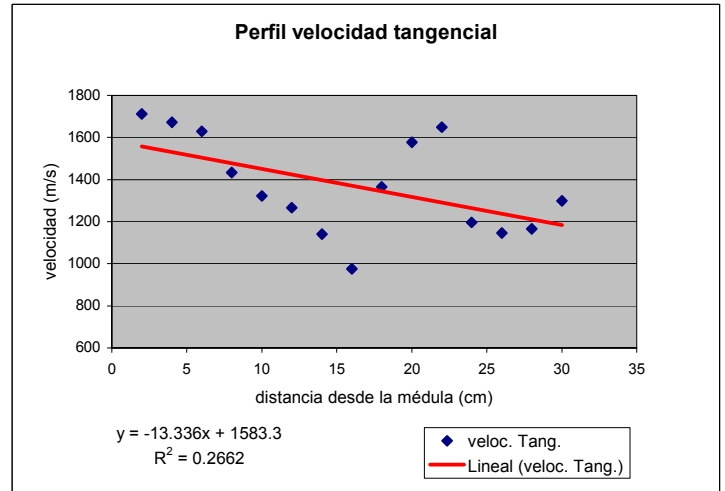


Figura N° 60: Rodela A, eje Y (+), 500 Mhz

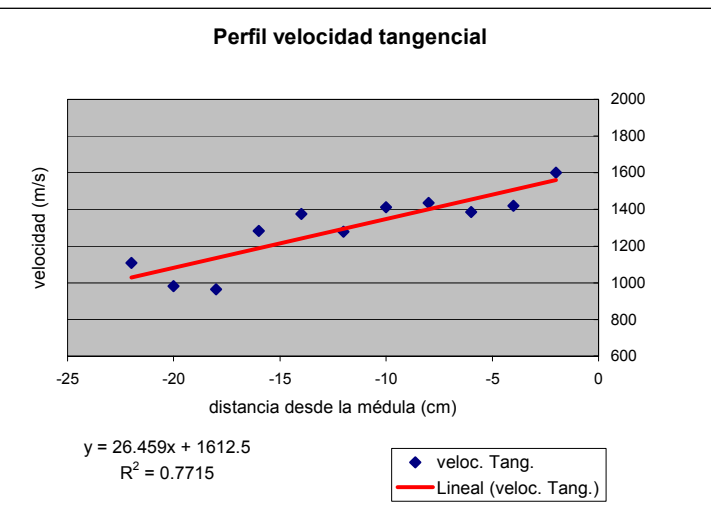


Figura N° 61: Rodela A, eje Y (-), 100 Mhz

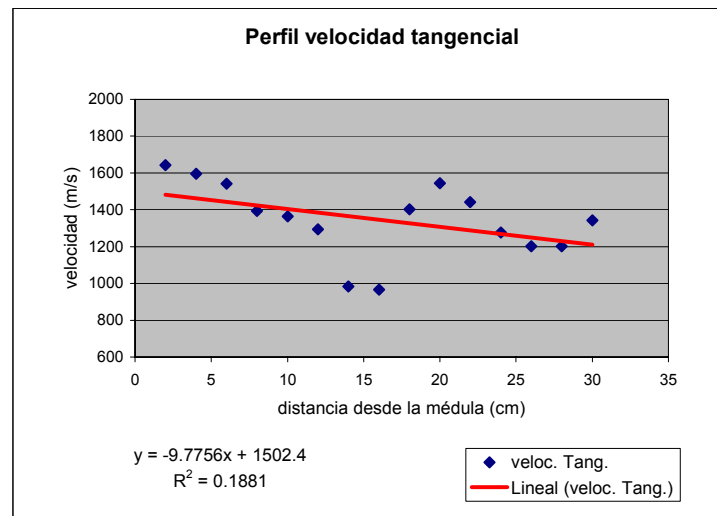


Figura N° 62: Rodela A, eje Y (+), 100 Mhz

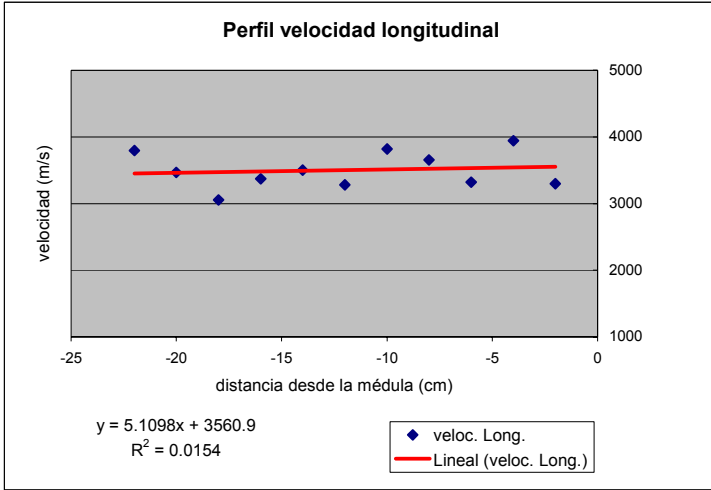


Figura N° 63: Rodela A, eje Y (-), 500 Mhz

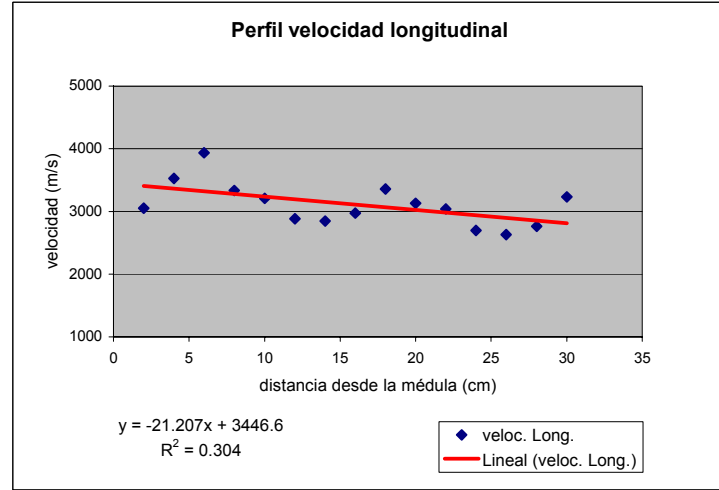


Figura N° 64: Rodela A, eje Y (+), 500 Mhz

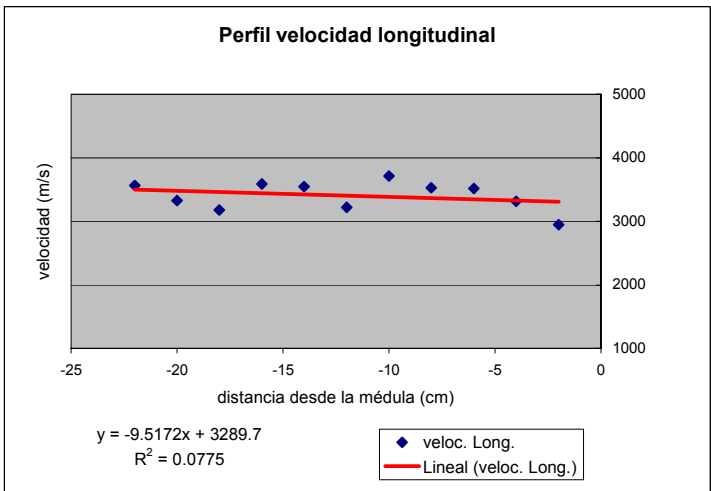


Figura N° 65: Rodela A, eje Y (-), 100 Mhz

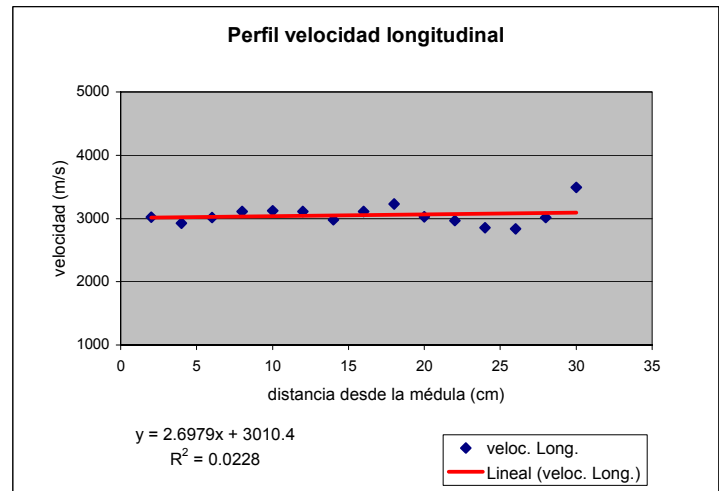


Figura N° 66: Rodela A, eje Y (+), 100 Mhz

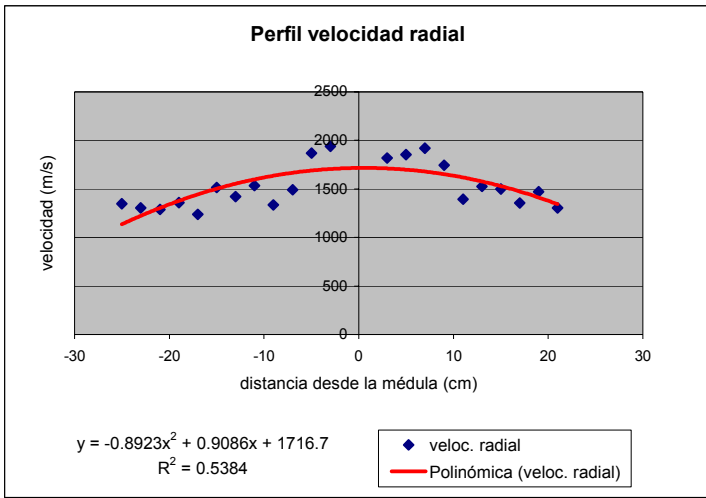


Figura N° 67: Rodela A, eje X , 500 Mhz

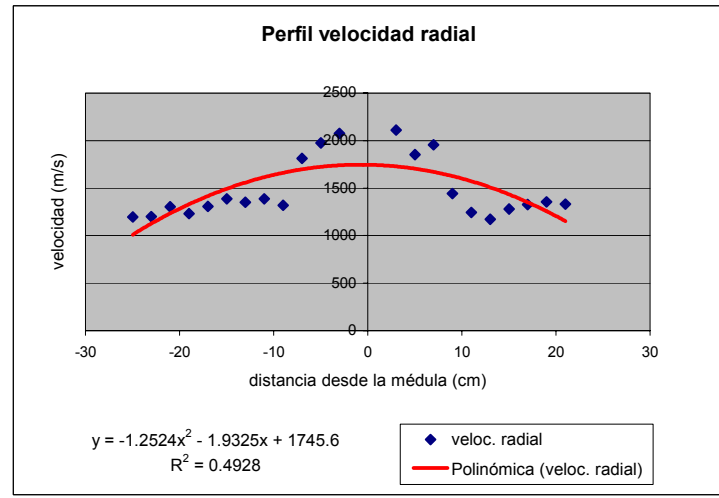


Figura N° 68: Rodela A, eje X , 100 Mhz

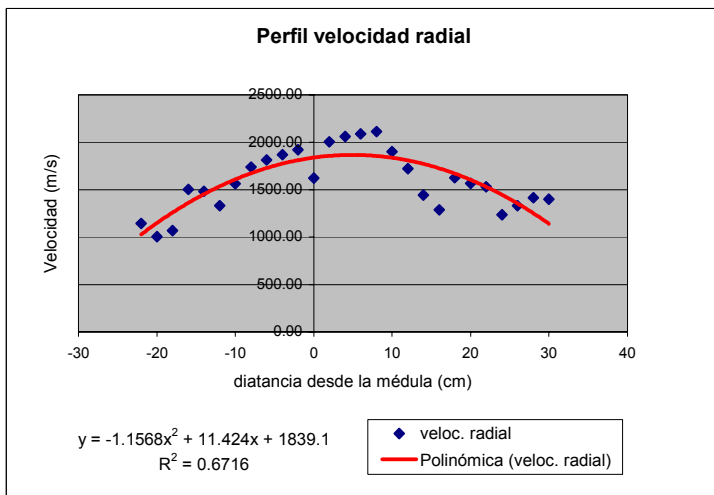


Figura N° 69: Rodela A, eje Y , 500 Mhz

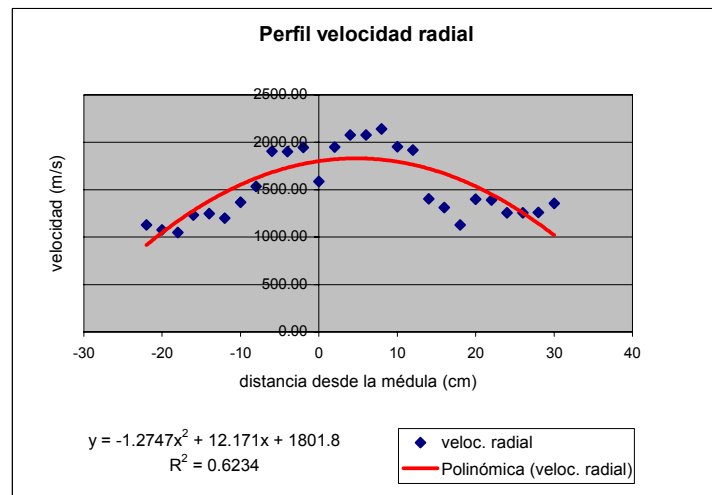


Figura N° 70: Rodela A, eje Y , 100 Mhz

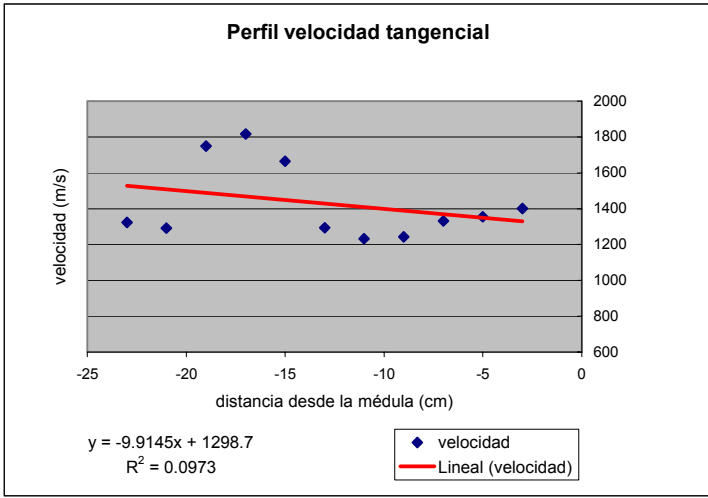


Figura N° 71: Rodela B, eje X (-), 500 Mhz

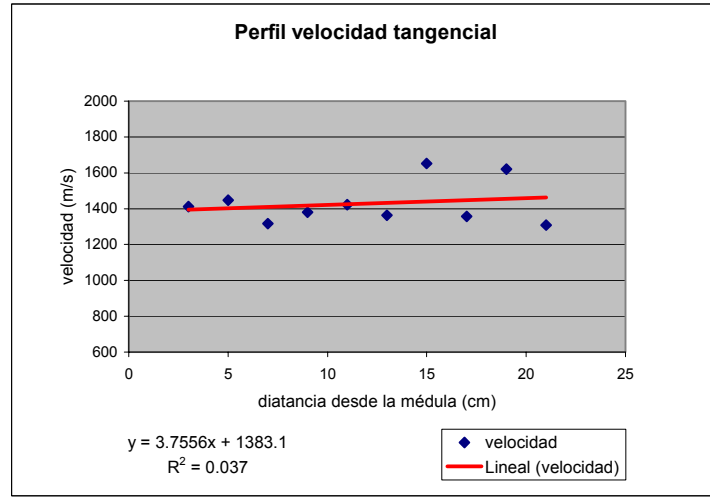


Figura N° 72: Rodela B, eje X (+), 500 Mhz

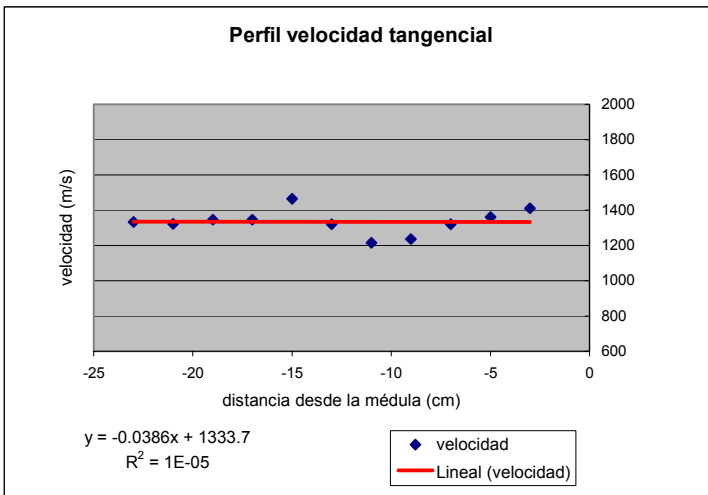


Figura N° 73: Rodela B, eje X (-), 100 Mhz

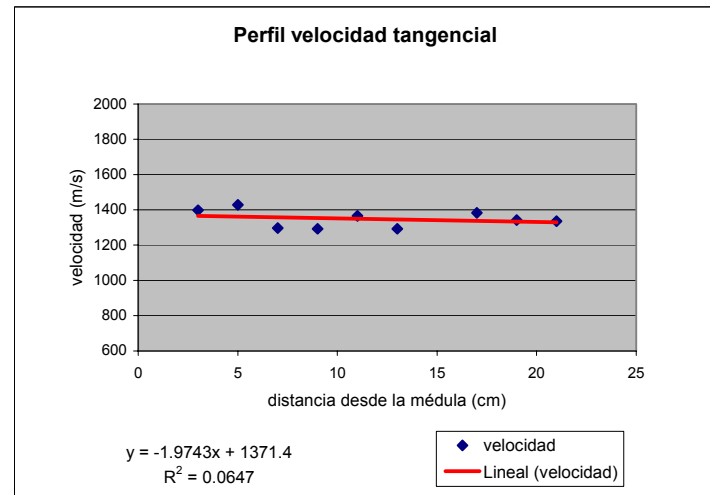


Figura N° 74: Rodela B, eje X (+), 100 Mhz

Perfil velocidad longitudinal

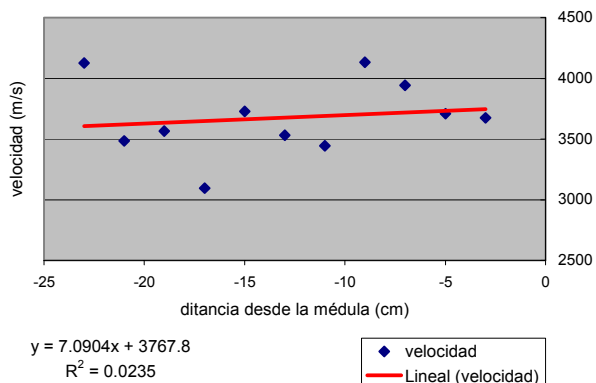


Figura N° 75: Rodela B, eje X (-), 500 Mhz

Perfil velocidad longitudinal

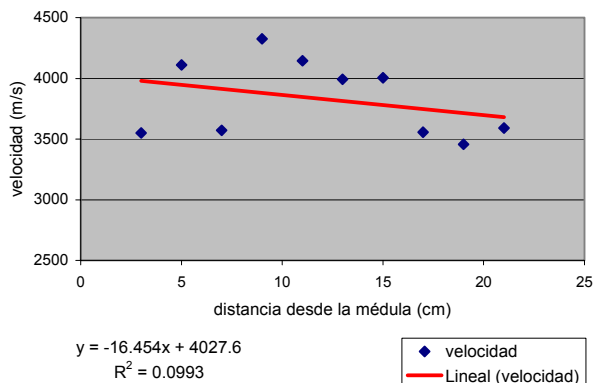


Figura N° 76: Rodela B, eje X (+), 500 Mhz

Perfil velocidad longitudinal

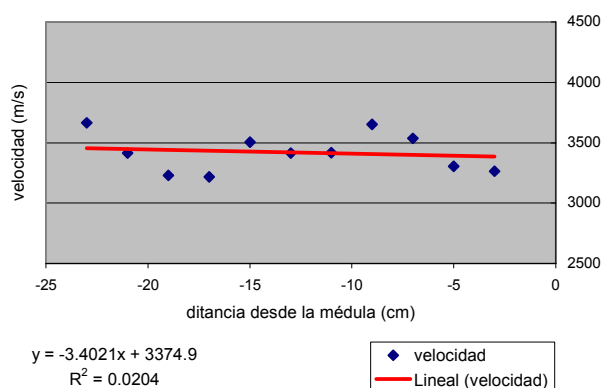


Figura N° 77: Rodela B, eje X (-), 100 Mhz

Perfil velocidad longitudinal

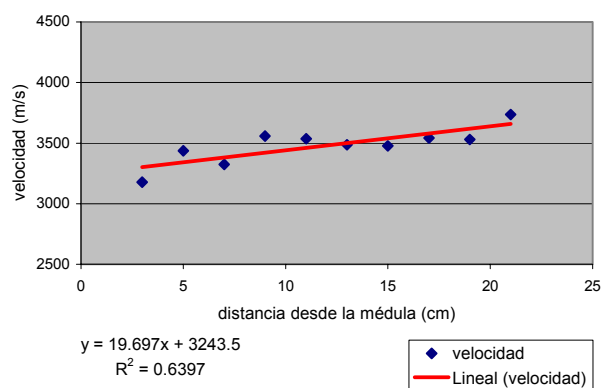


Figura N° 78: Rodela B, eje X (+), 100 Mhz

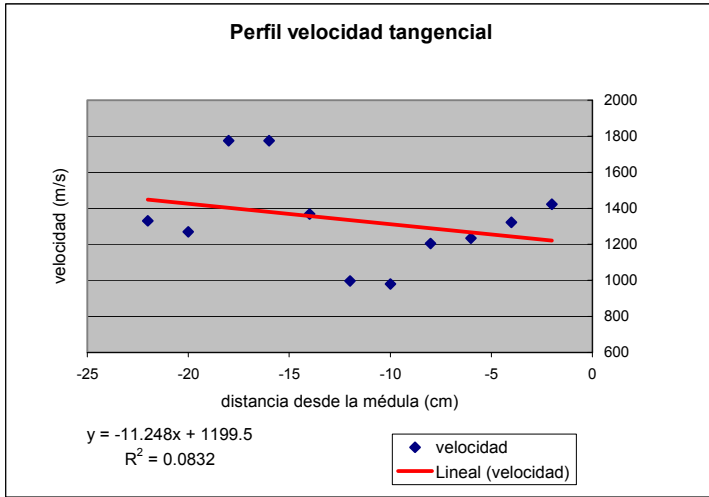


Figura N° 79: Rodela B, eje Y (-), 500 Mhz

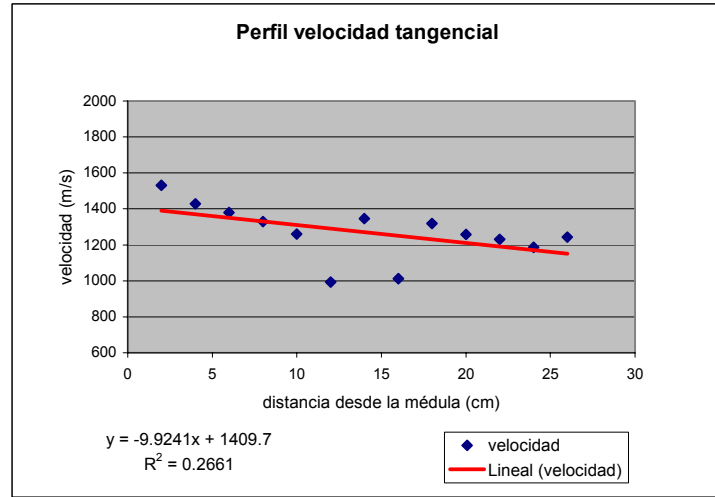


Figura N° 80: Rodela B, eje Y (+), 500 Mhz

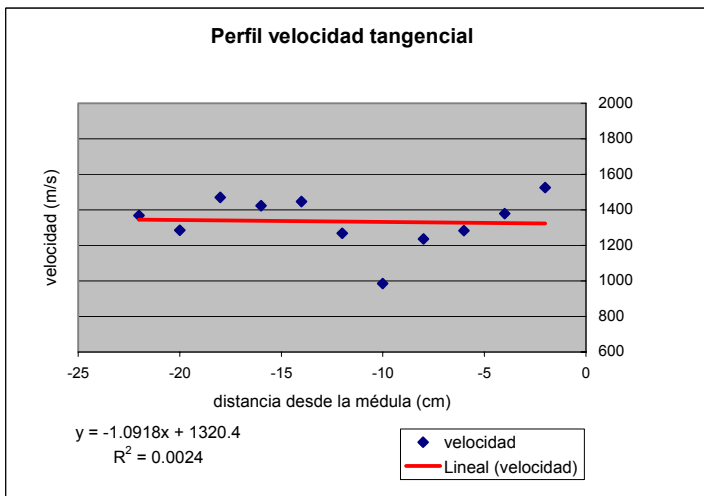


Figura N° 81: Rodela B, eje Y (-), 100 Mhz

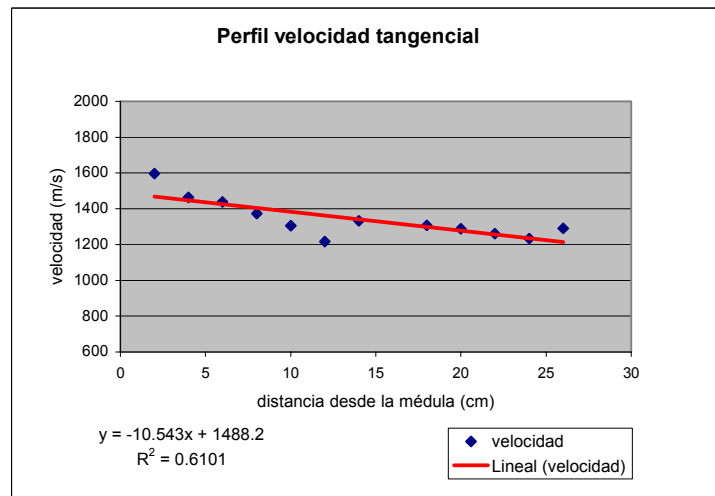


Figura N° 82: Rodela B, eje Y (+), 100 Mhz

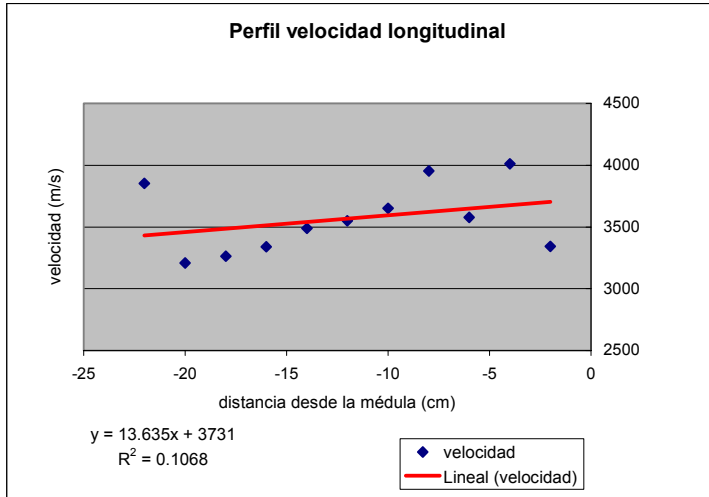


Figura N° 83: Rodela B, eje Y (-), 500 Mhz

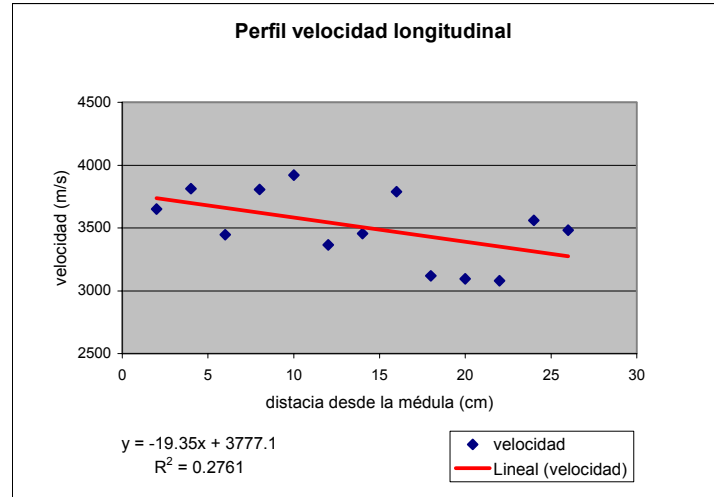


Figura N° 84: Rodela B, eje Y (+), 500 Mhz

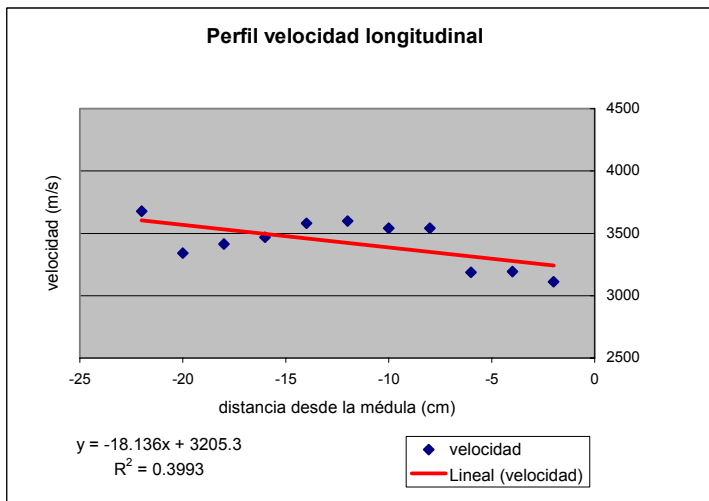


Figura N° 85: Rodela B, eje Y (-), 100 Mhz

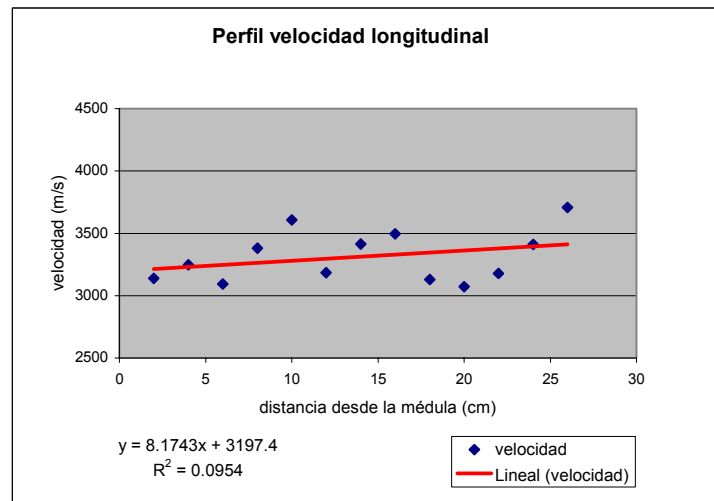


Figura N° 86: Rodela B, eje Y (+), 100 Mhz

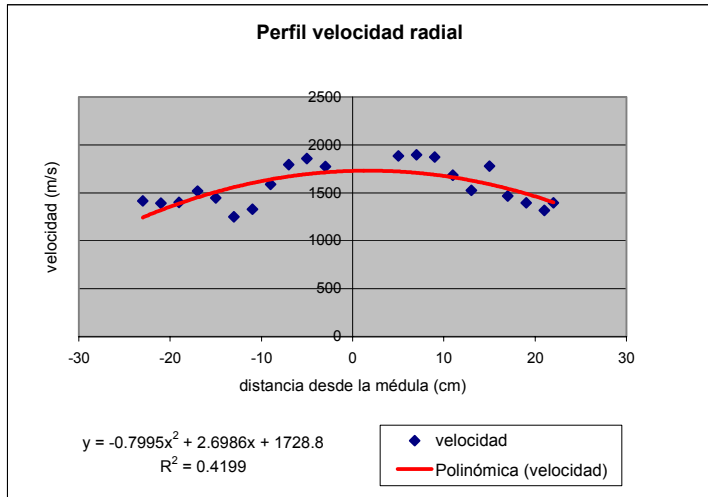


Figura N° 87: Rodela B, eje X (-), 500 Mhz

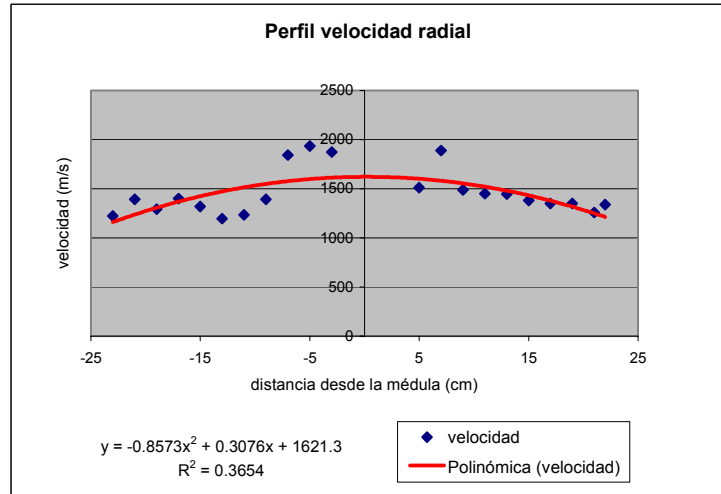


Figura N° 88: Rodela B, eje X (+), 100 Mhz

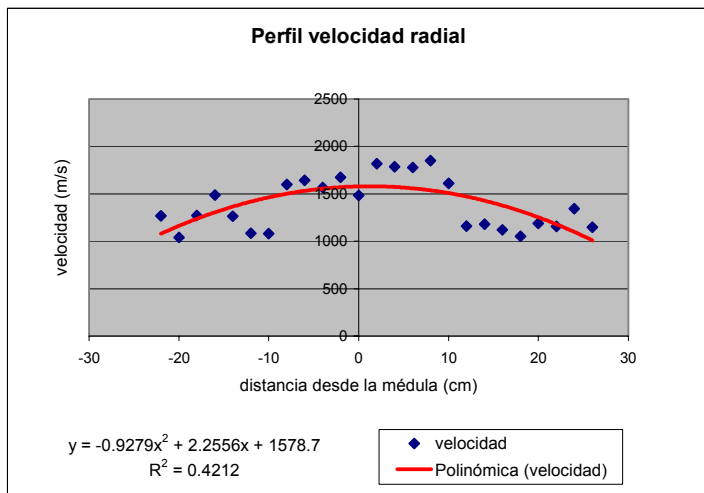


Figura N° 89: Rodela B, eje Y (-), 500 Mhz

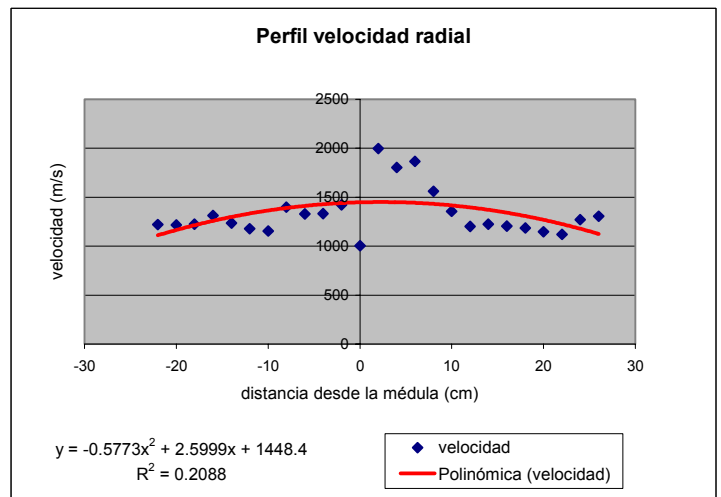


Figura N° 90: Rodela B, eje Y (+), 100 Mhz

4.3. Resultados del estudio morfológico de la singularidad

Se entregan los resultados obtenidos en cada rodela (Tablas N° 1 y N° 2) para de los siguientes parámetros: ángulo de inserción de la rama (θ), diámetro (D), longitud (L) y profundidad de oclusión (p.o).

Tabla N° 1: RODELA C, 4 NUDOS

	θ (°)	D (mm)	L (mm)	p.o. (mm)
Nudo A	36	14	104	4
Nudo B	53	42	119	6
Nudo C	45	58	110	3
Nudo D	25	28	83	6
Promedio	39.75	35.5	104	4.75

Tabla N° 2: RODELA D, 5 NUDOS

	θ (°)	D (mm)	L (mm)	p.o. (mm)
Nudo A	45	22	122	6
Nudo B	32	44	105	2
Nudo C	44	52	110	4
Nudo D	30	33	98	3
Nudo E	22	19	94	3
Promedio	34.6	34	105.8	3.6

	θ (°)	D (mm)	L (mm)	p.o. (mm)
Nudo Promedio	37.18	34.75	104.9	4.18

4.4. Ensayos ultrasónicos en madera libre de nudos

Con los equipos disponibles no fue posible la obtención de lecturas en las rodela como se indicó en la metodología planteada inicialmente, esto se atribuye principalmente a la distancia que separó ambos transductores al momento de la lectura, que fue alrededor de 35 cm. en promedio, correspondiente al tamaño de la rodela preparada. Además hay que considerar que éstas se encontraban en condiciones de contenido de humedad promedio superior al 100%. Ambas condiciones dificultaron la transmisión de la onda ultrasónica, debido a la excesiva atenuación de su energía, por lo cual no fue posible que ella se transmitiera en la distancia de medición sin extinguirse casi por completo.

Lo anterior coincide con lo indicado por Espejo (2000), quien demostró que siendo mayor el contenido de humedad de la madera mayor es la atenuación experimentada por la onda. El efecto atenuador que tiene el agua en los lúmenes se debe principalmente a las propiedades del agua y el bajo peso molecular de los extraíbles contenidos en ella. Además hay que considerar la densidad que posee la madera en ese estado, lo que hace más difícil aún la transmisión de las ondas en este medio. Sin embargo cabe hacer notar

que se intentó con todos los medios disponibles la obtención de lecturas, se aumentó al máximo la ganancia en dB del generador de pulsos, se amplificó el poder de la señal y se aplicaron los filtros disponibles en el osciloscopio, pero igualmente no fue posible captar la señal emitida. Además se estableció el uso de transductores de 100 Khz, debido a que a menor frecuencia de estos mayor es la capacidad de penetración de la onda emitida; lo cual por las características del material lo hacía necesario.

4.5. Detección del cilindro central defectuoso

Como las rodela preparadas tenían características similares a las de la madera libre de nudo, tampoco fue posible la obtención de lecturas de propagación ultrasónica.

Como método alternativo se utilizó sin éxito el de eco-reflejado, éste fracaso se debió posiblemente a las razones de atenuación antes expuestas.

Igualmente se consideró que al existir material de nudo en el interior de la rodela, que se encontraba en ciertas ocasiones enfrentándose a la onda, esto hipotéticamente facilitaría la transmisión por existir fibras en sentido longitudinal y mayor densidad de material, donde se hace más fácil la transmisión, pero tampoco fue posible recibir la lectura de las ondas emitidas.

4.6. Posicionamiento de nudos en probetas cúbicas

Se realizó una ultrasonografía en 4 probetas cúbicas que provenían de dos rodela distintas. Los datos obtenidos se muestran en las Tablas N° 23 a la N° 34 (ANEXOS) y los gráficos en las Figuras N° 91 a la N°102.

Hay que hacer notar que en las Figuras N° 91, 92, 93 y 94 se compara la ultrasonografía con su fotografía correspondiente.

En el dirección radial y tangencial se observó una influencia clara de los nudos en las velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas, lo cual se puede observar a través de la comparación de los gráficos y las fotografías de los cubos.

Los valores obtenidos muestran que la velocidad en dirección longitudinal es mucho mayor que en dirección radial y tangencial. (Tabla N° 3).

MUESTRA	Dirección de propagación	Velocidad Máxima (m/s)	Velocidad Mínima (m/s)	Velocidad Media (m/s)
CUBO A	Longitudinal	5425	2924	4068
	Radial	1714	1173	1409
	Tangencial	1684	944	1415
CUBO B	Longitudinal	4610	2230	3615
	Radial	1609	1012	1331
	Tangencial	1982	935	1481
CUBO C	Longitudinal	4180	2444	3296
	Radial	1529	1050	1271
	Tangencial	1814	993	1463
CUBO D	Longitudinal	4025	2876	3467
	Radial	1544	1067	1271
	Tangencial	1906	946	1476

Tabla N° 3: Velocidades promedio en muestras cúbicas

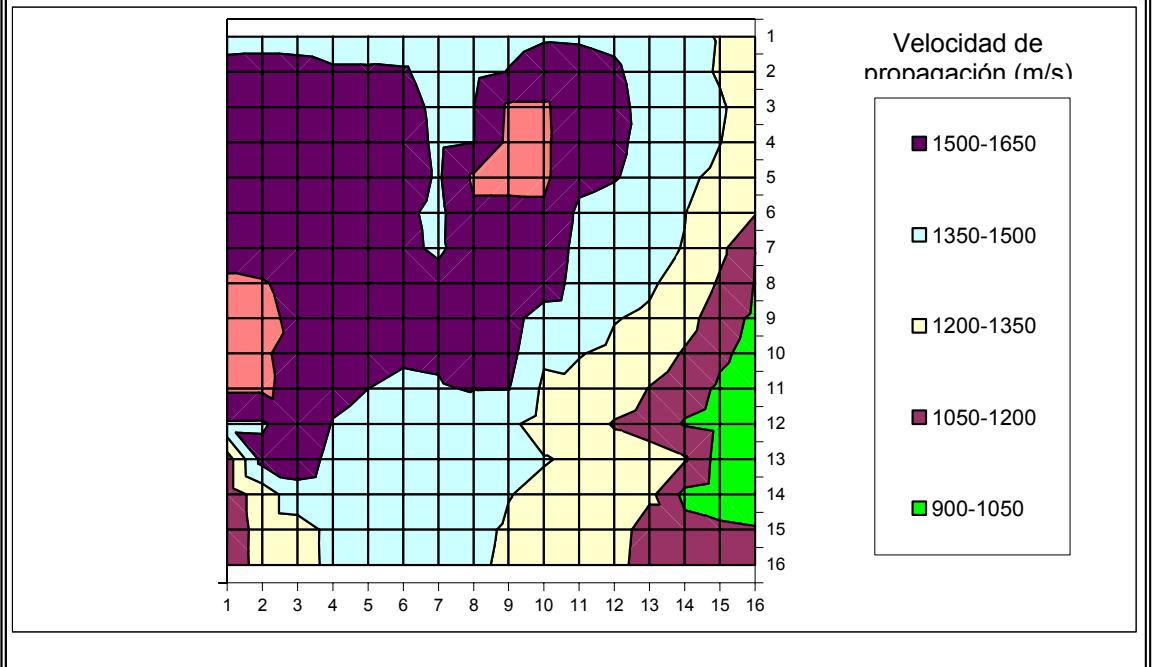


Figura N° 91: Comparación entre fotografía y ultrasonografía del CUBO A.

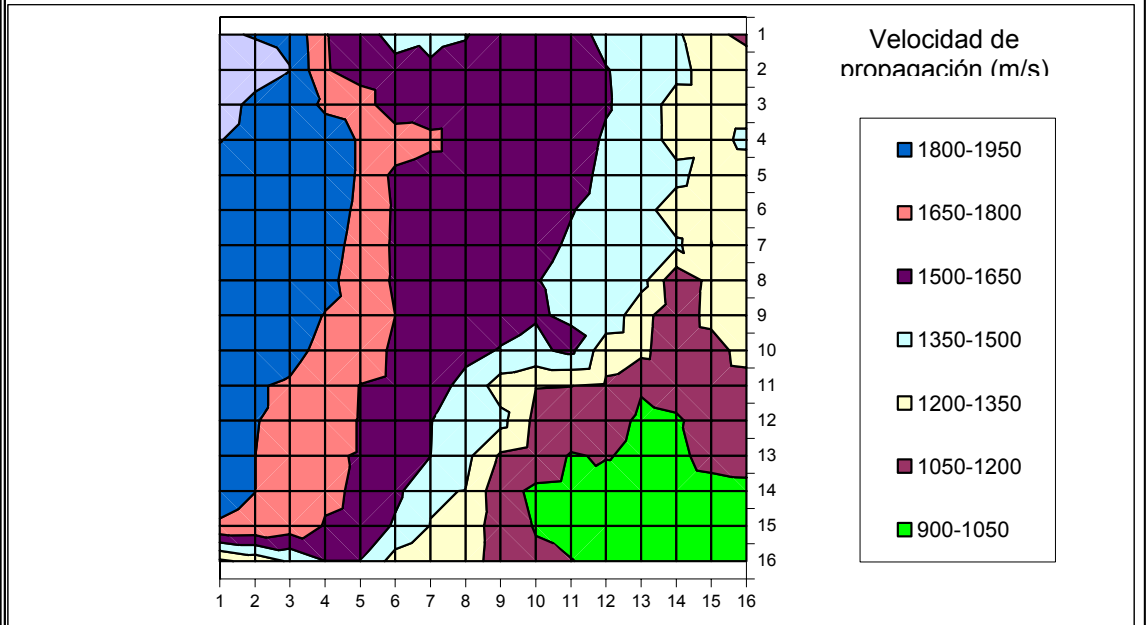


Figura N° 92: Comparación entre fotografía y ultrasonografía del CUBO B.

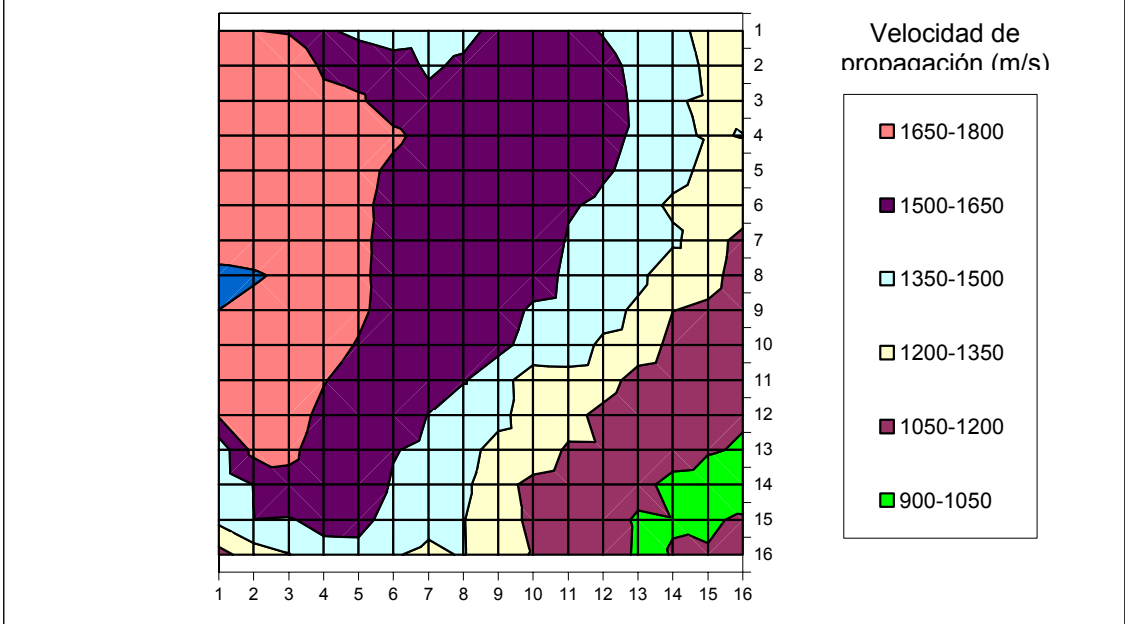


Figura N° 93: Comparación entre fotografía y ultrasonografía del CUBO C.

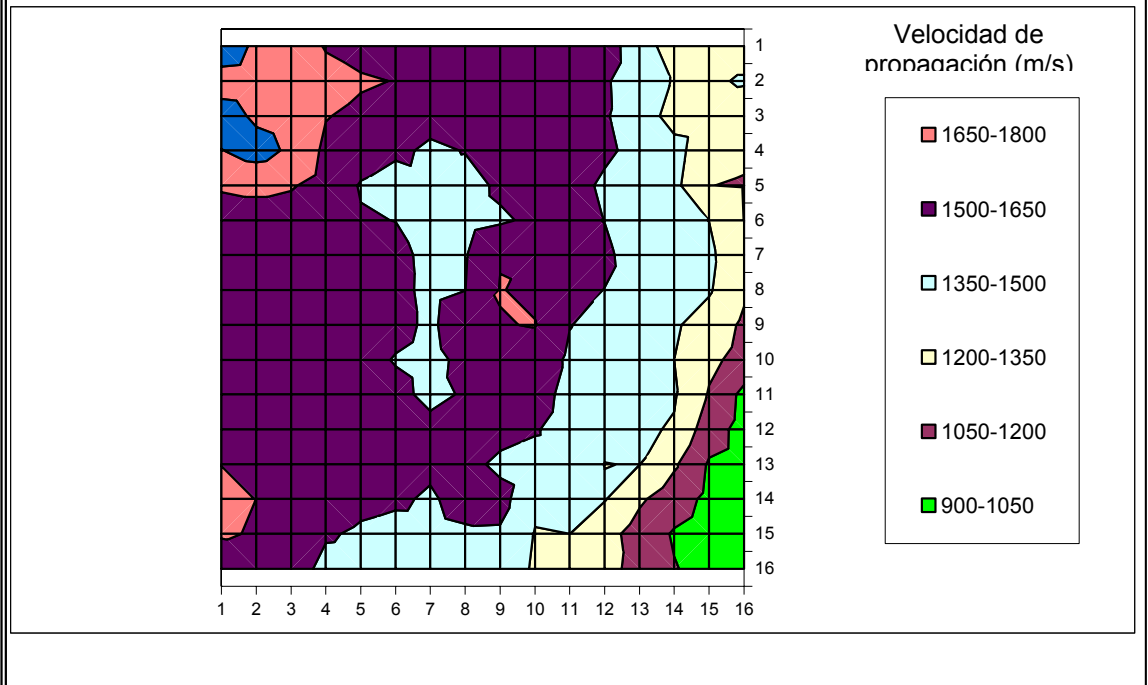
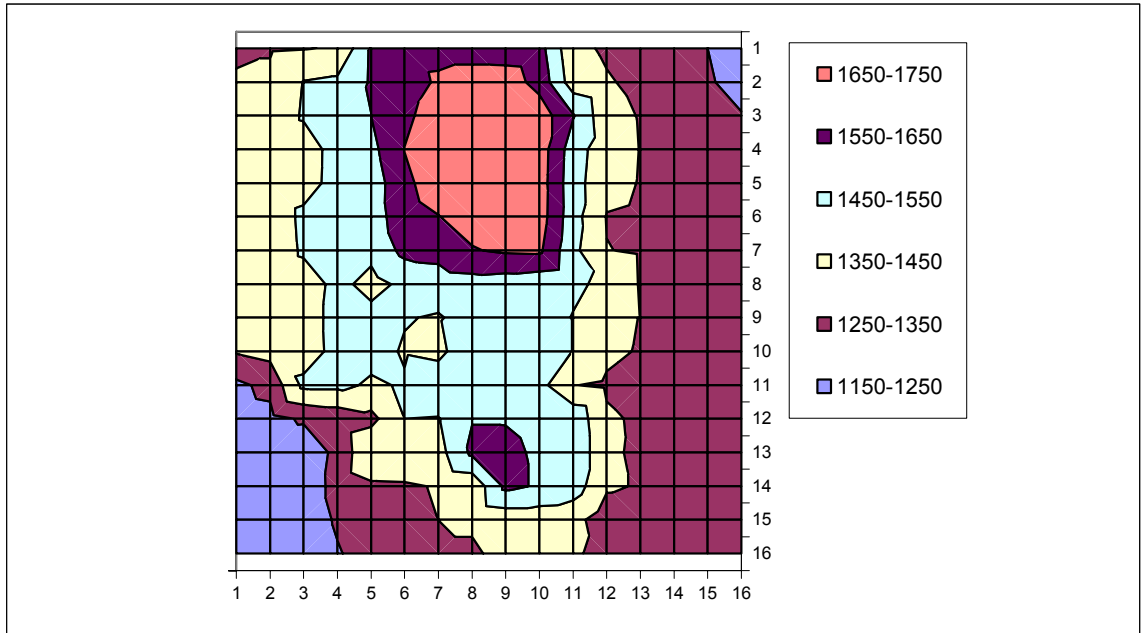
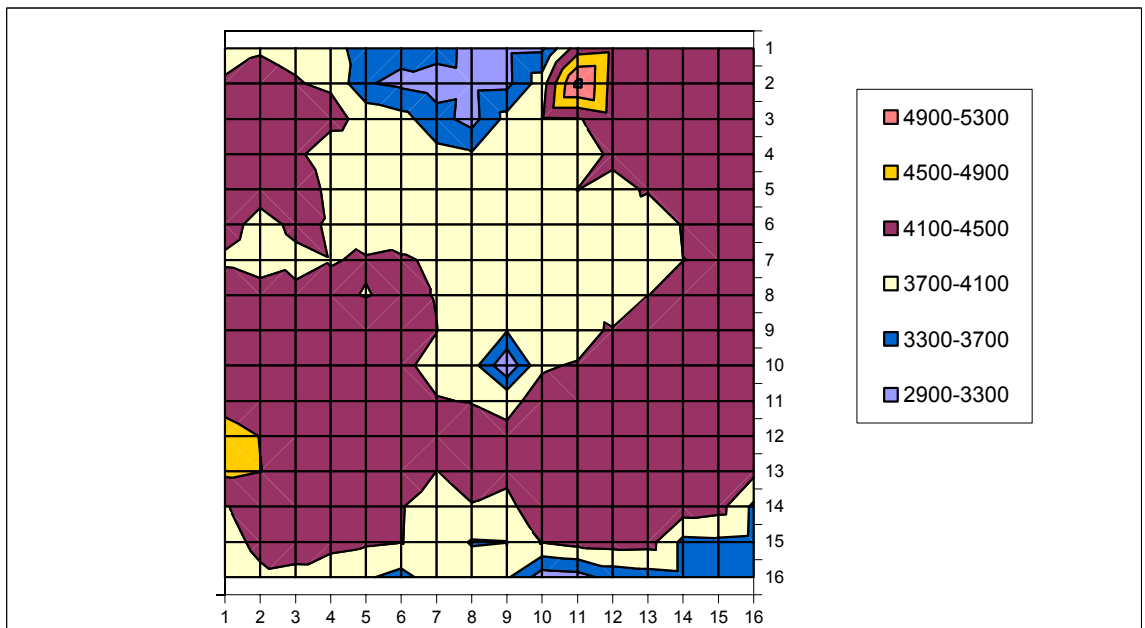


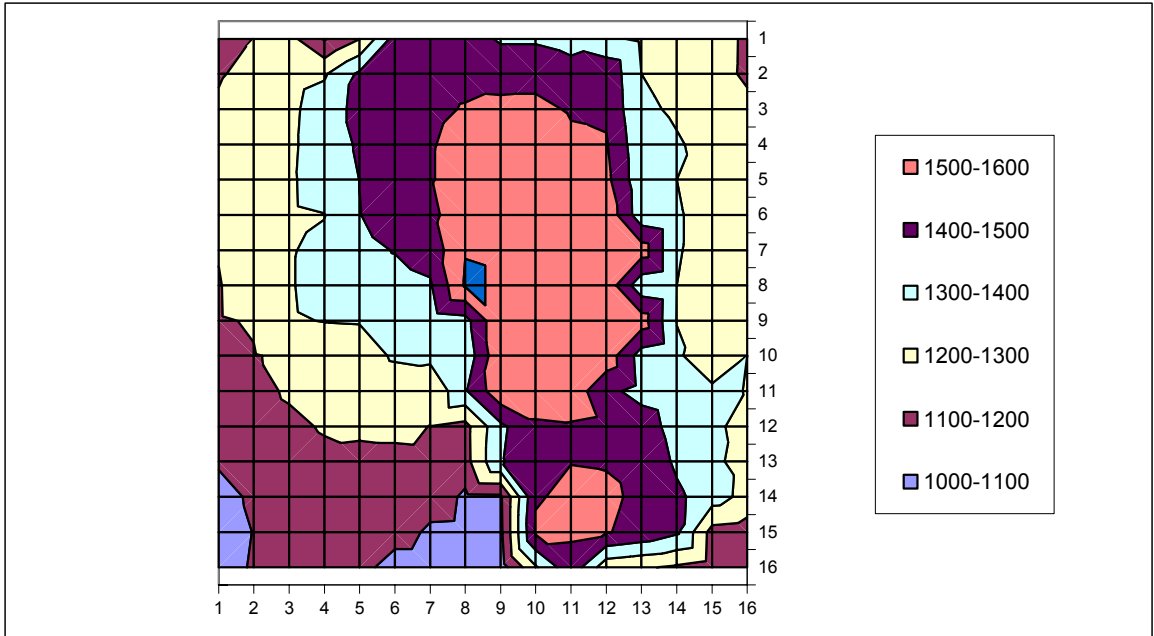
Figura N° 94: Comparación entre fotografía y ultrasonografía del CUBO D.



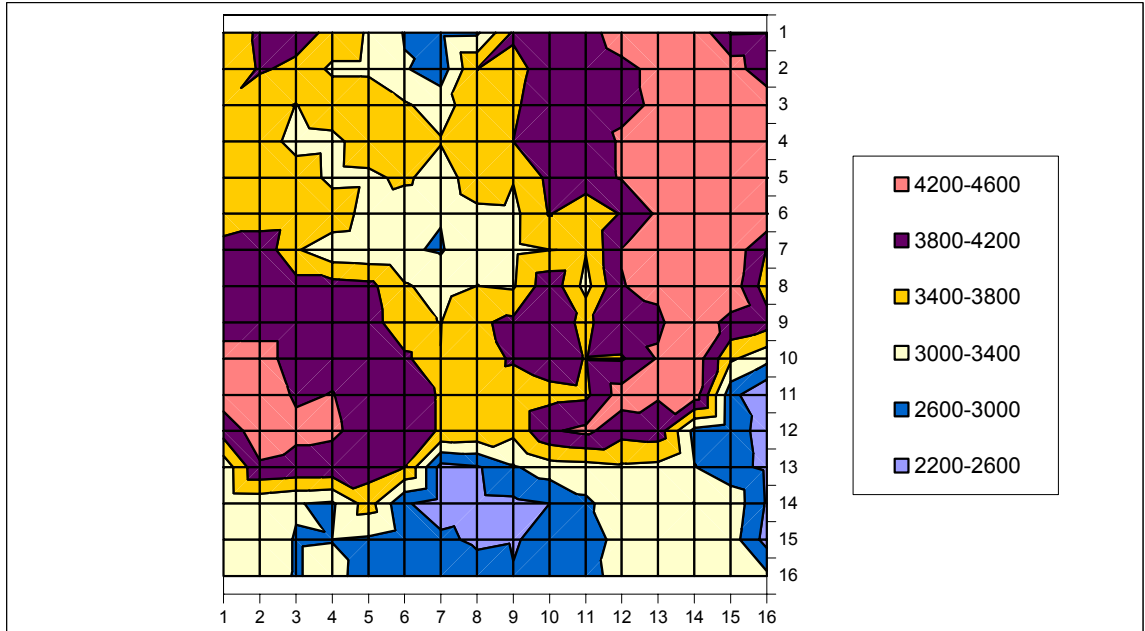
**Figura N° 95: velocidades CUBO A (m/s)
CARA RADIAL**



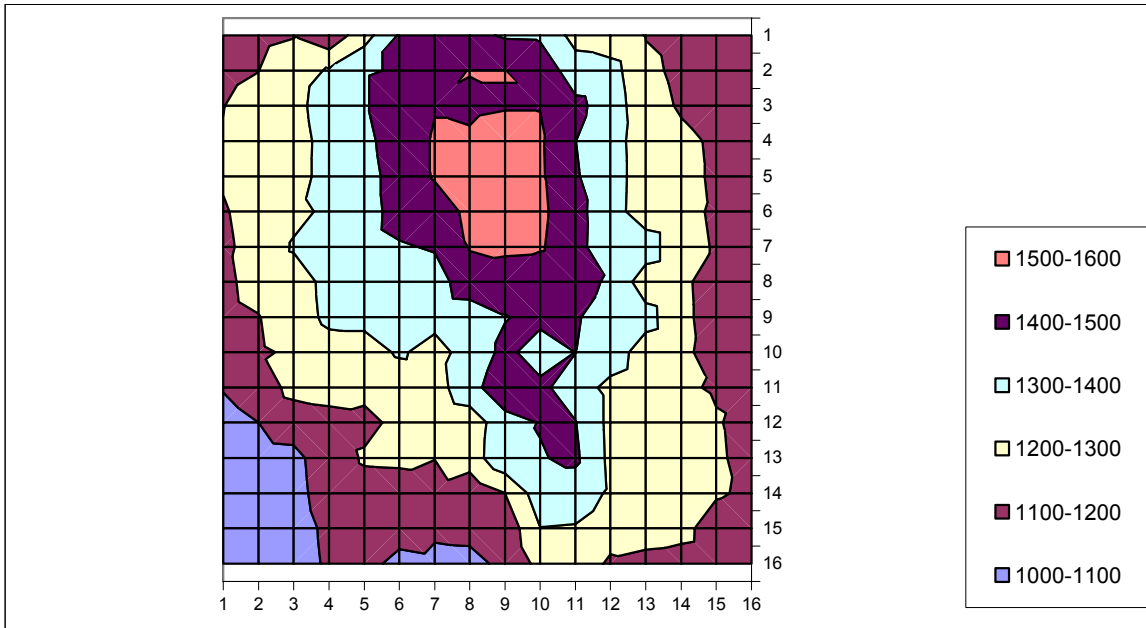
**Figura N° 96: velocidades CUBO A (m/s)
CARA LONGITUDINAL**



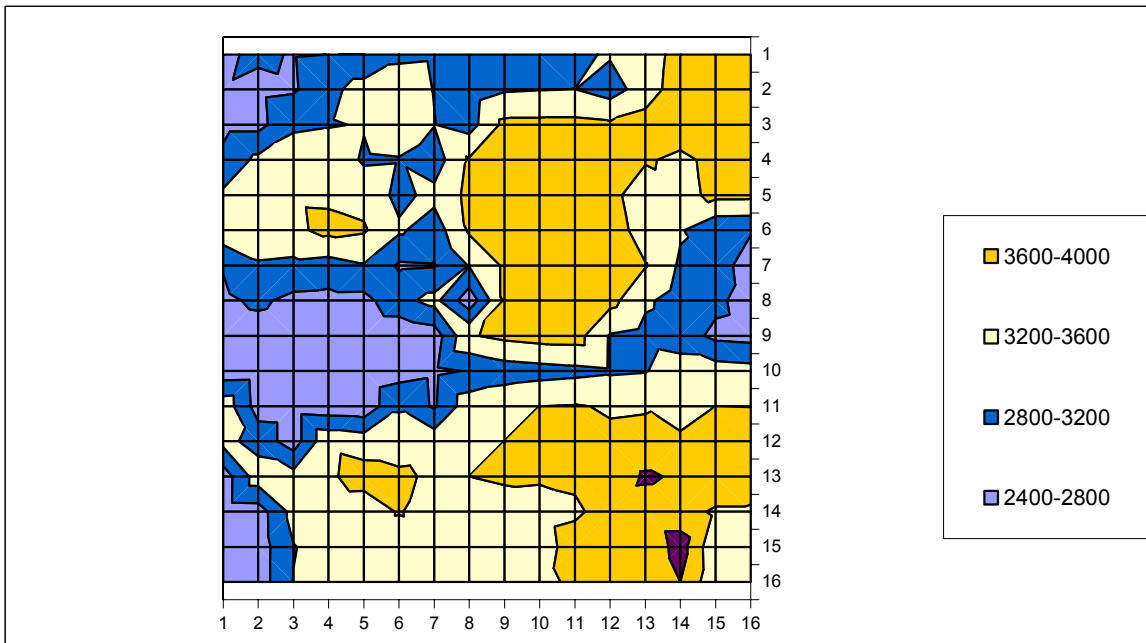
**Figura N° 97: velocidades CUBO B (m/s)
CARA RADIAL**



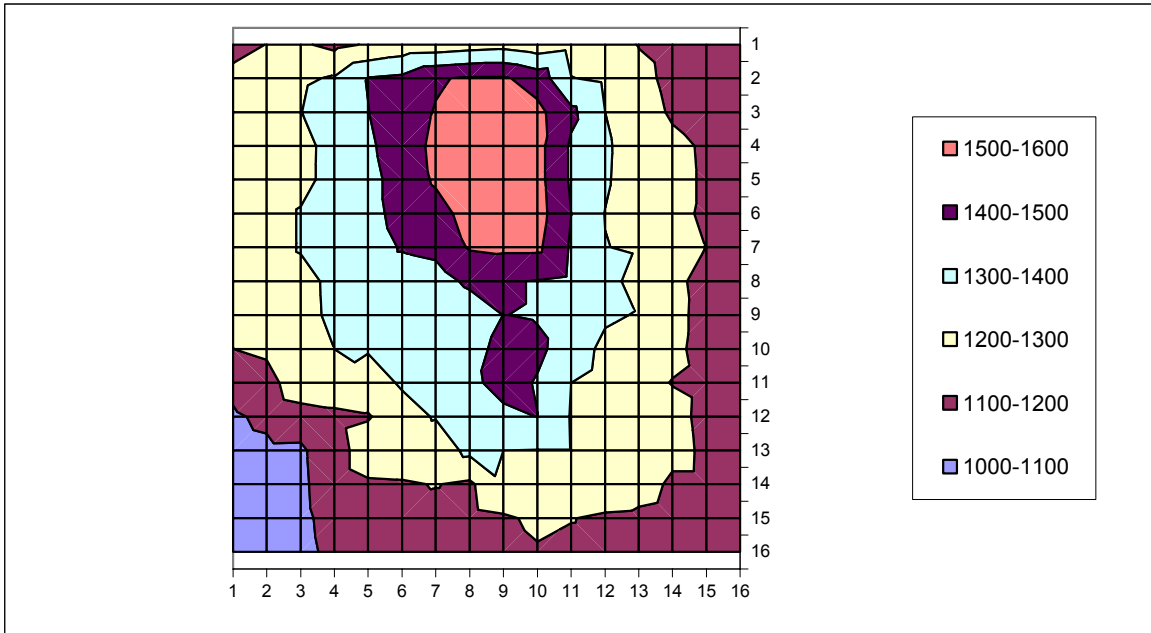
**Figura N° 98: velocidades CUBO B (m/s)
CARA LONGITUDINAL**



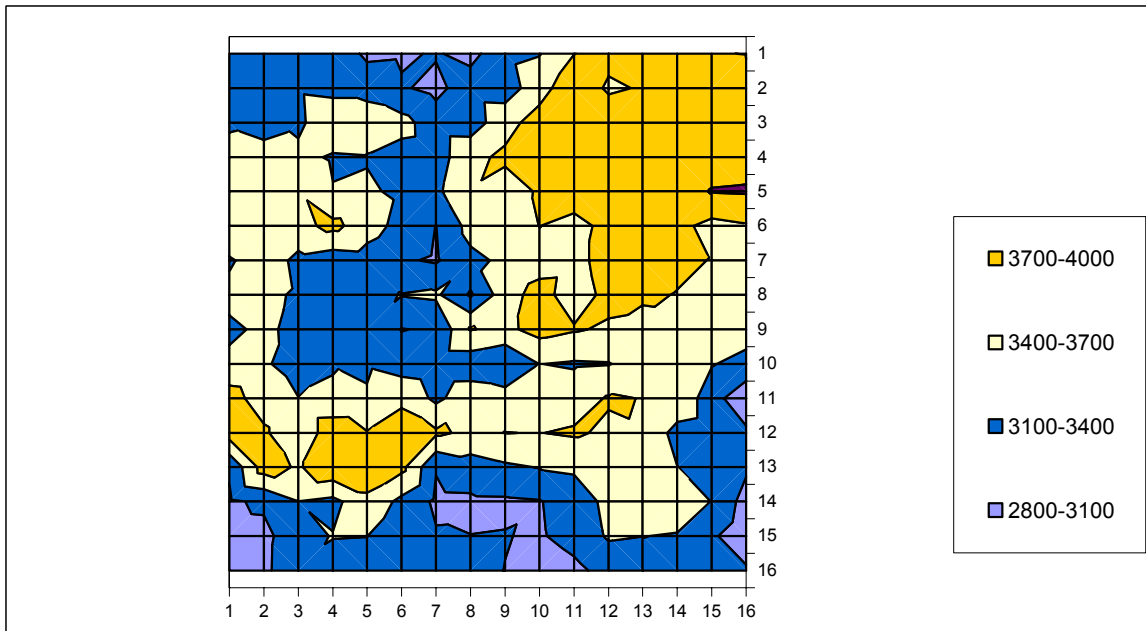
**Figura N° 99: velocidades CUBO C (m/s)
CARA RADIAL**



**Figura N° 100: velocidades CUBO C (m/s)
CARA LONGITUDINAL**



**Figura N° 101: velocidades CUBO D (m/s)
CARA RADIAL**



**Figura N° 102: velocidades CUBO D (m/s)
CARA LONGITUDINAL**

Al comparar la fotografías con las ultrasonografías tangenciales (Figuras N° 91 a la N° 94) se observó claramente que el ángulo del nudo y la delimitación de éste, se puede predecir a partir de la gráfica obtenida.

Se observa una influencia de la singularidad en la velocidad de propagación para la dirección tangencial, es decir el nudo puede posicionarse a través de esta metodología, ya que los valores de las velocidades de propagación varían según exista madera sin defectos y madera con singularidad.

Tanto en dirección radial como tangencial la velocidad de propagación es mayor cuando atraviesa la singularidad, y va disminuyendo a medida que se aleja de ésta. Sin embargo las Figuras N° 103 a la N° 106 se observó que la velocidad en dirección tangencial, medida en 3 trayectorias del cubo, no muestra una diferencia en cuanto a los valores de la zona con nudo y la zona de madera limpia. Esto probablemente se debió a que en la zona de madera sin nudo que se midió existe desviación de las fibras y de los anillos de crecimiento, lo cual afectó los valores obtenidos.

Además hay que agregar que se sometió uno de los cubos a una ecografía médica, este ensayo estuvo a cargo del Médico Gineco –Obstetra Hernán Muñoz Salazar. Los resultados obtenidos a partir de esta experiencia fueron negativos, ya que el ecógrafo solo podía penetrar alrededor de 2 centímetros en el cubo de madera. La explicación de este fenómeno se debe a que los tejidos humanos tienen mayor continuidad y propiedades más homogéneas (coloidales) a diferencia de la madera, por lo cual una máquina de éstas características necesita ser rediseñada para su uso en otros materiales.

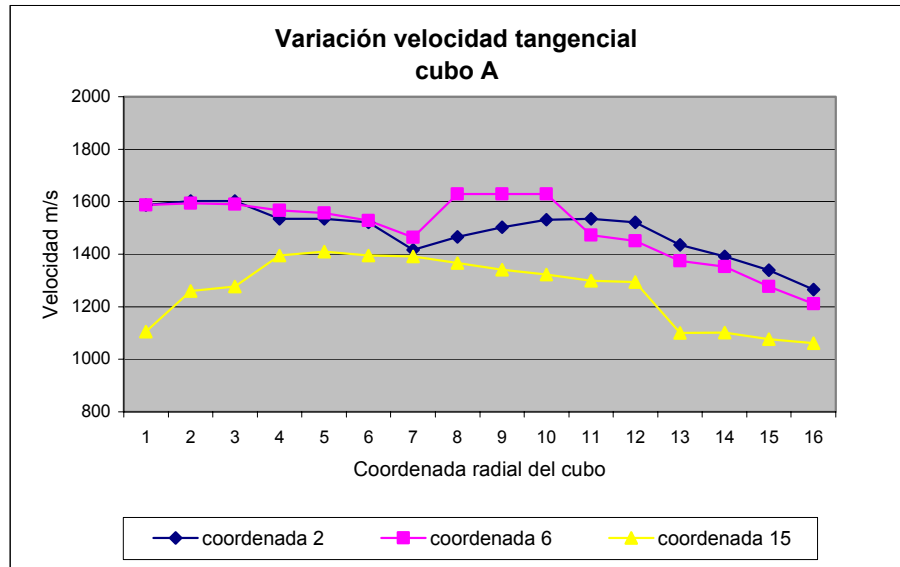


Figura N° 103: Perfiles velocidad tangencial CUBO A

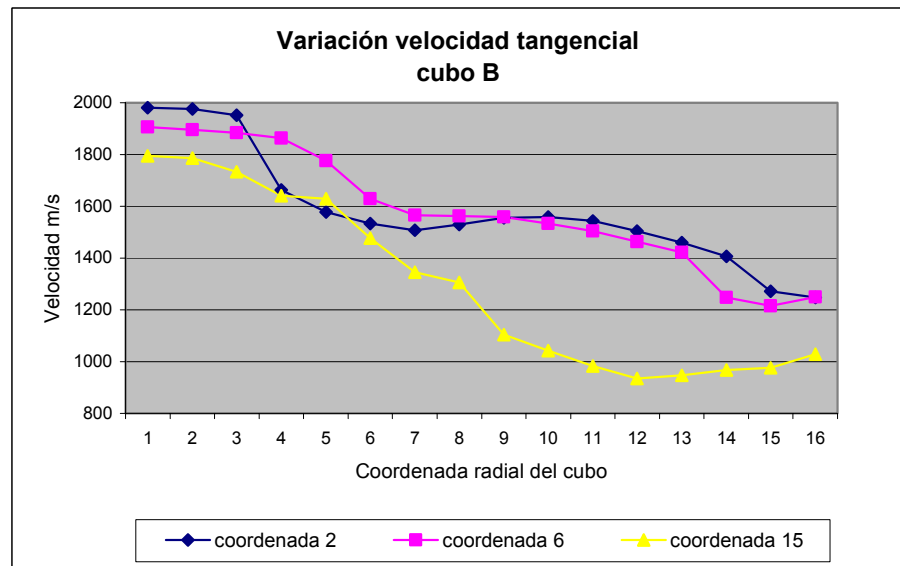


Figura N° 104: Perfiles velocidad tangencial CUBO B

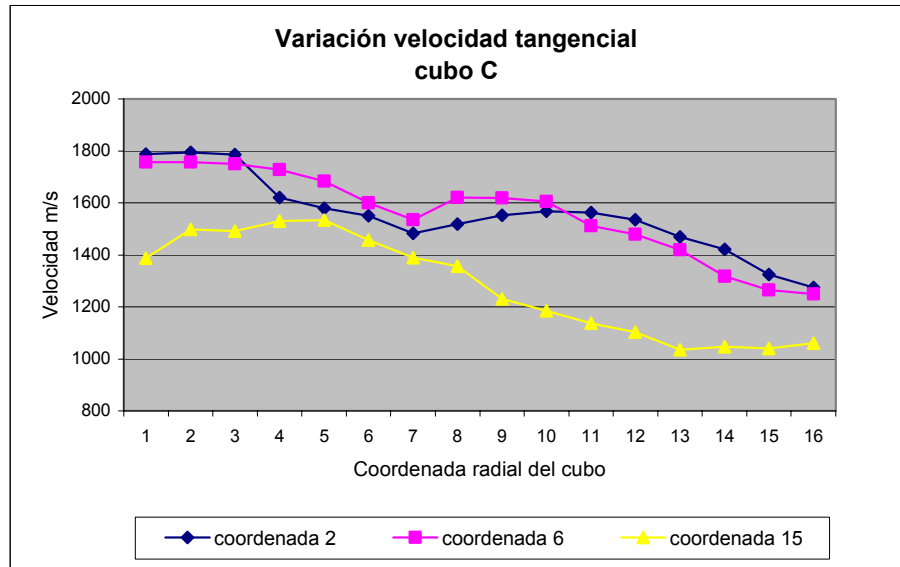


Figura N° 105: Perfiles velocidad tangencial CUBO C

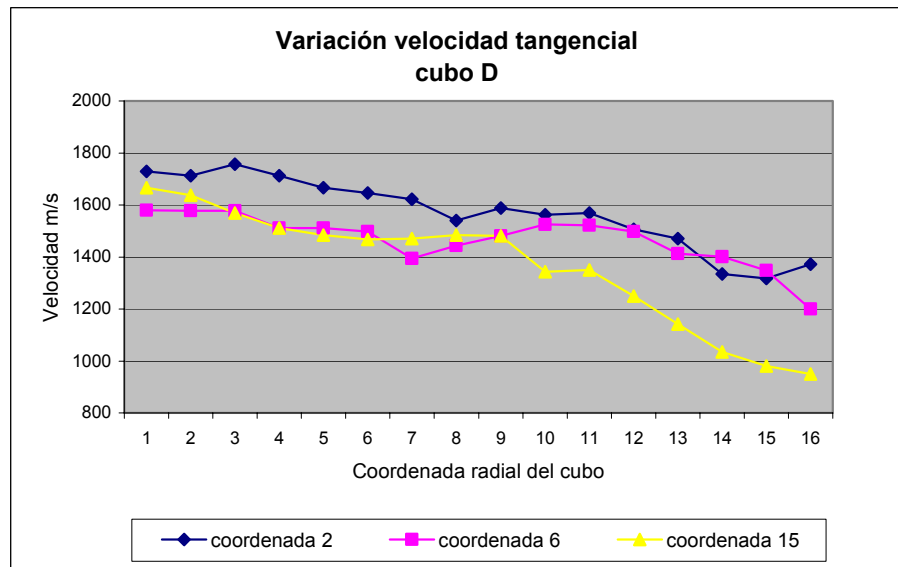


Figura N° 106: Perfiles velocidad tangencial CUBO D

5. CONCLUSIONES

- Para el caso de trozas la medición con los equipos utilizados no permitió la transmisión del ultrasonido a través de los diámetros que se utilizaron para el ensayo, agregando a esto las condiciones de humedad y densidad de la madera, que atenuaban demasiado la onda no siendo posible realizar mediciones.
- Otra dificultad operativa es el medio y la superficie de contacto, si bien del primero existen algunas sustancias utilizadas para ensayos ultrasónicos en otras áreas de investigación, la atenuación que se produce por efecto de las diferencias de impedancias entre los medios hace difícil las lecturas de transmisión ultrasónica. Con respecto a la superficie de contacto ésta debe ser plana debido a los transductores que se dispusieron para los ensayos, por lo cual se hace necesario el desarrollo de transductores que superen esta limitación, especialmente si se pretende el desarrollo de equipos de medición en terreno.
- Se constató que la velocidad de propagación es un parámetro menos sensible a las condiciones de ensayo que la atenuación ultrasónica, por lo cual se utilizó la primera con los fines de detectar los nudos internos en la madera.
- Es posible delimitar la posición del nudo confinado dentro de un cubo en condiciones de laboratorio, a través de una ultrasonografía que se le realiza a la muestra en las tres direcciones ortogonales con las cuales se establece el posicionamiento y el tamaño del nudo.
- Mediante el presente estudio se deja evidencia que la singularidad y su zona de influencia tiene efectos claros sobre la velocidad de propagación especialmente en direcciones transversales.
- Con fines de análisis de la interacción de las ondas ultrasónicas con la singularidad es posible la utilización de esta metodología como predictor del tamaño del cilindro defectuoso.
- Para la utilización del método, con respecto al objetivo general de la memoria, se debe resolver el principal problema correspondiente a la generación de ondas más energéticas, logradas mediante equipamiento y transductores adecuados.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ALMAGRO H., V., 1967. Los ultrasonidos: teoría y aplicaciones. Madrid, España. 130p.
- BEALL, F.,C., 1993. Development of an acousto-ultrasonic scanning system for nondestructive evaluation of wood and wood laminates. *Wood and Fiber Science* 25, (3): 289-297.
- BUCUR, V., 1995. Acoustic of Wood. Library of Congress Cataloging-in-publication Data. 284p.
- BUCUR, V., and ARCHER, R. R., 1984. Elastic constants for wood by ultrasonic method. *Wood Science and Technology* 18: 225-265.
- CONAF, 1983. Manual sobre el pago de bonificación por gastos de manejo. Gerencia Técnica. Departamento de Control Forestal.
- ESPEJO, H. F., 2002. Efecto de la densidad y contenido de humedad de la madera de pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) sobre la atenuación y velocidad de propagación ultrasónica. Tesis Magister en Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, 64 p.
- GOSNELL, T., 1987. Equations for predicting defect core size for pruned radiata pine butt logs. New Zealand Forest Service, FRI Bulletin N° 131. 20p.
- KARSULOVIC, J. T., GAETE, L., LEÓN, L. A., 1998. Estudio de la anisotropía de la madera de *Pinus radiata* (D. Don) mediante ultrasonido. 1^{er} Congreso Latinoamericano IUFRO. Valdivia, Chile. 7p.
- KARSULOVIC, J.T., L., LEÓN, L. A., 1994. Reflexiones de ondas de esfuerzo por la presencia de nudos en la Madera de Pino (*Pinus radiata* (D. Don)). *Ciencias Forestales*, 9, (1-2): 53-61.
- KARSULOVIC, J. T., LEÓN, L. A., GAETE, L., 2000. Ultrasonic detection of knot and annual ring orientation in *Pinus radiata* lumber. *Wood and Fiber Science* 32, (3): 278-286.
- KNOWLES, R., L., 1970. Occlusion defect in pruned pinus radiata logs. FRI Symposium, 2 (12), paper 33. 2p.
- MCKENZIE, C., 1999. La Madera libre de nudos de pino radiata en los mercados mundiales. Ficha Técnica N°1, Lignum, Agosto 1999:27-28.
- MENESES, M., VELASCO, J., 1992. Comportamiento del diámetro del cilindro con defectos en parcelas sometidas a diversos tratamientos de poda y raleo. *Pinus radiata*, Investigación en Chile, tomo II. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales: 98- 123.

- MONTOYA, J., M., 1988. La poda de los árboles forestales. Agroguías Mundi-Prensa. Madrid, 71 p.
- OLIVARES, B., DÍAZ-VAZ, J. E., JUACIDA, R., MENESES, M., POBLETE, H., 1985. Modelo de predicción del diámetro del cilindro con defectos de *Pinus radiata* (D. Don). *Pinus radiata*, Investigación en Chile, tomo II. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales: 86-103.
- OLIVARES, B., MENESES, M., 1992. Predicción del tamaño del cilindro central con defectos y estimación del rendimiento de madera aserrada libre de nudos. *Pinus radiata*, Investigación en Chile, tomo II. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales: 86- 97.
- PALAZUELOS, R., 1995. Análisis del diámetro del cilindro defectuoso en árboles podados de *Pinus Radiata* (D. Don) en la precordillera andina de la VIII Región. Memoria Ing. Forestal, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Escuela de Ciencias Forestales. Santiago, 62 p.
- PARK, J. C., 1982. Occlusion and the defect core in pruned radiata pine. New Zealand Forest Service, FRI Bulletin N° 2. 15p.
- ROSS, R., J., PELLERIN, R., F., 1991. NDE of green material with stress waves: preliminary results using dimension lumber. Forest Product Journal, 41 (6):57-59.
- SANDOZ, J. L., 1989. Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology, 23: 95-108.
- SANDOZ, J. L., 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. Wood Science and Technology, 27: 373-380.
- SERRA, M., T., 1987. Dendrología de Coníferas y otras Gimnospermas. Apuntes Docentes N°2, Universidad de Chile, Facultas de Cs. Agrarias y Forestales, Dpto. de Silvicultura, 264 p.
- SERWAY, R., 1993. Física, incluye Física Moderna. Tomo I, 3° edición, Editorial McGraw-Hill Interamericana de México S.A., México, 637 p.
- TSOUMIS, G, 1991. Science and Technology of Wood. Structure, Properties, Utilization. Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 494 p.
- VELASCO, J., 1992. Rendimiento de madera aserrada libre de nudos en trozas podadas de *Pinus radiata* (D. Don) . Tesis Ing, Forestal, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, 74 p.
- VELASCO, J., MENESES, M., 1992. Rendimiento de madera aserrada libre de nudos en trozos provenientes de rodales con raleo a desecho. *Pinus radiata*, Investigación en Chile, tomo II. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales: 98- 108.

ANEXOS

Tabla N° 1: Datos físicos Rodela A eje X							
probeta	posición cm.	peso verde	peso seco	volumen verde	contenido humedad	densidad verde	densidad básica
X1	-25	25.31	9.43	23.48	168.40	1.08	0.40
X2	-23	28.75	9.98	27.13	188.08	1.06	0.37
X3	-21	31.07	10.26	29.71	202.83	1.05	0.35
X4	-19	29.33	9.75	28.32	200.82	1.04	0.34
X5	-17	30.01	10.25	28.51	192.78	1.05	0.36
X6	-15	31.78	11.48	29.53	176.83	1.08	0.39
X7	-13	29.84	10.62	28.24	180.98	1.06	0.38
X8	-11	31.01	10.64	30.13	191.45	1.03	0.35
X9	-9	24.53	8.71	25.05	181.63	0.98	0.35
X10	-7	17.75	10.73	31.30	65.42	0.57	0.34
X11	-5	14.77	9.86	29.22	49.80	0.51	0.34
X12	-3	14.65	10.27	32.81	42.65	0.45	0.31
	0						
X13	3	14.97	10.29	32.06	45.48	0.47	0.32
X14	5	14.37	9.90	29.79	45.15	0.48	0.33
X15	7	14.91	9.81	29.15	51.99	0.51	0.34
X16	9	18.91	10.04	29.96	88.35	0.63	0.34
X17	11	24.64	8.69	26.41	183.54	0.93	0.33
X18	13	28.19	10.69	27.90	163.70	1.01	0.38
X19	15	30.46	10.81	28.87	181.78	1.06	0.37
X20	17	29.74	9.82	28.97	202.85	1.03	0.34
X21	19	30.12	9.82	31.07	206.72	0.97	0.32
X22	21	26.59	9.65	25.65	175.54	1.04	0.38
MAXIMO		31.78	11.48	32.81	206.72	1.08	0.40
MINIMO		14.37	8.69	23.48	42.65	0.45	0.31
MEDIA		24.62	10.07	28.78	144.85	0.87	0.35
DESV.		6.42	0.63	2.20	62.46	0.24	0.02
CV%		26.06	6.30	7.63	43.12	28.15	6.80

Tabla N° 2: Datos físicos Rodela A eje Y							
probeta	posición cm.	peso verde	peso seco	volumen verde	contenido humedad	densidad verde	densidad básica
Y1	-22	34.62	13.31	34.27	160.11	1.01	0.39
Y2	-20	25.40	8.82	25.79	187.98	0.98	0.34
Y3	-18	31.04	10.33	31.62	200.48	0.98	0.33
Y4	-16	26.60	9.38	26.62	183.58	1.00	0.35
Y5	-14	28.51	10.55	27.48	170.24	1.04	0.38
Y6	-12	32.93	12.07	32.54	172.83	1.01	0.37
Y7	-10	25.23	10.33	27.77	144.24	0.91	0.37
Y8	-8	15.55	9.65	28.26	61.14	0.55	0.34
Y9	-6	13.71	9.27	29.29	47.90	0.47	0.32
Y10	-4	13.20	9.41	28.82	40.28	0.46	0.33
Y11	-2	12.03	8.45	27.24	42.37	0.44	0.31
Y12	0	14.00	9.86	29.79	41.99	0.47	0.33
Y13	2	13.37	9.70	29.18	37.84	0.46	0.33
Y14	4	13.78	10.02	27.52	37.52	0.50	0.36
Y15	6	13.57	9.72	27.32	39.61	0.50	0.36
Y16	8	13.12	9.27	27.73	41.53	0.47	0.33
Y17	10	16.36	10.94	28.89	49.54	0.57	0.38
Y18	12	19.13	11.62	28.99	64.63	0.66	0.40
Y19	14	24.62	10.65	28.71	131.17	0.86	0.37
Y20	16	32.42	12.98	30.50	149.77	1.06	0.43
Y21	18	29.33	10.97	27.30	167.37	1.07	0.40
Y22	20	30.30	12.43	28.23	143.77	1.07	0.44
Y23	22	29.57	11.03	27.86	168.09	1.06	0.40
Y24	24	31.74	11.97	29.36	165.16	1.08	0.41
Y25	26	32.03	13.23	29.43	142.10	1.09	0.45
Y26	28	31.60	12.47	28.98	153.41	1.09	0.43
Y27	30	33.24	13.90	30.30	139.14	1.10	0.46
MAXIMO		34.62	13.90	34.27	200.48	1.10	0.46
MINIMO		12.03	8.45	25.79	37.52	0.44	0.31
MEDIA		23.59	10.83	28.88	114.21	0.81	0.37
DESV.		8.10	1.48	1.79	58.76	0.26	0.04
CV%		34.32	13.72	6.21	51.45	32.53	11.09

Tabla N° 3: Datos físicos Rodela B eje X							
probeta	posición cm	peso verde	peso seco	volumen verde	contenido humedad	densidad verde	densidad básica
X1	-23	28.05	10.22	27.45	174.46	1.02	0.37
X2	-21	27.74	9.16	26.90	202.84	1.03	0.34
X3	-19	23.54	7.65	22.34	207.71	1.05	0.34
X4	-17	26.17	8.77	25.29	198.40	1.03	0.35
X5	-15	29.42	9.92	26.90	196.57	1.09	0.37
X6	-13	26.13	8.81	24.63	196.59	1.06	0.36
X7	-11	27.81	9.17	25.99	203.27	1.07	0.35
X8	-9	17.45	8.91	24.64	96.85	0.71	0.36
X9	-7	13.04	8.56	26.52	52.34	0.49	0.32
X10	-5	10.46	7.25	23.74	44.28	0.44	0.31
X11	-3	11.77	8.11	26.48	45.13	0.44	0.31
	0						
X12	3	14.43	9.69	30.95	48.92	0.47	0.31
X13	5	13.30	8.85	26.06	50.28	0.51	0.34
X14	7	12.97	8.04	25.70	61.32	0.50	0.31
X15	9	18.44	9.00	26.16	104.89	0.70	0.34
X16	11	25.82	8.71	24.80	196.44	1.04	0.35
X17	13	29.15	9.96	27.90	192.67	1.04	0.36
X18	15	28.44	9.76	26.93	191.39	1.06	0.36
X19	17	30.06	9.64	29.26	211.83	1.03	0.33
X20	19	24.47	7.61	24.01	221.55	1.02	0.32
X21	21	28.06	9.60	27.25	192.29	1.03	0.35
MAXIMO		30.06	10.22	30.95	221.55	1.09	0.37
MINIMO		10.46	7.25	22.34	44.28	0.44	0.31
MEDIA		22.22	8.92	26.19	147.10	0.85	0.34
DESV.		6.81	0.81	1.86	68.03	0.26	0.02
CV%		30.66	9.13	7.12	46.25	30.18	5.97

Tabla N° 4: Datos físicos Rodela B eje Y							
probeta	posición cm	peso verde	peso seco	volumen verde	contenido humedad	densidad verde	densidad básica
Y1	-22	32.43	12.02	31.03	169.80	1.05	0.39
Y2	-20	26.75	8.94	26.02	199.22	1.03	0.34
Y3	-18	25.80	8.54	24.70	202.11	1.04	0.35
Y4	-16	29.49	9.68	26.50	204.65	1.03	0.34
Y5	-14	28.52	9.79	26.48	191.32	1.08	0.37
Y6	-12	26.69	9.78	26.75	172.90	1.00	0.37
Y7	-10	23.54	8.36	25.44	181.58	0.93	0.33
Y8	-8	15.94	9.60	28.15	66.04	0.57	0.34
Y9	-6	12.37	8.13	25.50	52.15	0.49	0.32
Y10	-4	13.10	8.68	27.47	50.92	0.48	0.32
Y11	-2	10.53	7.18	25.75	46.66	0.41	0.28
Y12	0	10.05	6.87	24.80	46.29	0.41	0.28
Y13	2	12.28	8.66	28.60	41.80	0.43	0.30
Y14	4	12.75	9.07	26.37	40.57	0.48	0.34
Y15	6	14.21	9.96	26.59	42.67	0.53	0.37
Y16	8	13.14	8.77	26.02	49.83	0.50	0.34
Y17	10	16.68	9.24	26.22	80.52	0.64	0.35
Y18	12	29.30	10.07	28.27	190.96	1.04	0.36
Y19	14	27.54	9.85	26.68	179.59	1.03	0.37
Y20	16	28.65	10.87	27.67	163.57	1.04	0.39
Y21	18	27.48	10.24	27.25	168.36	1.01	0.38
Y22	20	24.30	9.50	25.05	155.79	0.97	0.38
Y23	22	27.05	9.72	27.12	178.29	1.00	0.36
Y24	24	27.31	10.27	26.81	165.92	1.02	0.38
Y25	26	27.98	10.29	27.05	171.91	1.03	0.38
MAXIMO		32.43	12.02	31.03	204.65	1.08	0.39
MINIMO		10.05	6.87	24.70	40.57	0.41	0.28
MEDIA		21.76	9.36	26.81	128.54	0.81	0.35
DESV.		7.35	1.08	1.38	64.13	0.26	0.03
CV%		33.79	11.56	5.15	49.89	32.48	8.90

Tabla N° 5: Velocidades en viguetas			Tabla N° 6: Velocidades en viguetas		
Rodela A			Rodela A		
500 Khz	VELOCIDADES m/s		100 Khz	VELOCIDADES m/s	
	tg	long		tg	long
X1	1362.44	4679.78	X1	1336.03	4338.54
X2	1334.41	4454.55	X2	1305.03	3966.67
X3	1270.23	3617.39	X3	1291.93	3799.09
X4	1912.64	4000.00	X4	1308.18	3764.71
X5	1906.18	3878.50	X5	1334.94	3738.74
X6	1662.67	3688.89	X6	1490.16	3896.71
X7	1578.75	3924.53	X7	1596.93	4223.35
X8	1511.84	3735.43	X8	1511.84	3637.55
X9	1457.75	3427.98	X9	1258.36	3358.87
X10	1223.37	4098.52	X10	1251.13	3314.74
X11	1349.67	3237.35	X11	1390.57	3525.42
X12	1426.34	3768.18	X12	1512.87	3213.18
X13	1469.03	3691.96	X13	1537.04	3759.09
X14	1395.94	3608.70	X14	1527.78	3672.57
X15	1352.94	4019.32	X15	1473.31	4160.00
X16	1121.46	3971.29	X16	1207.85	4278.35
X17	1273.01	4524.59	X17	1387.96	3961.72
X18	1506.35	3620.09	X18	1178.98	3966.51
X19	1534.32	3833.33	X19	1270.35	4078.82
X20	1685.71	4103.96	X20	1496.38	4229.59
X21	1287.95	3785.39	X21	1456.64	4024.27
X22	1305.73	4234.69	X22	1472.17	4088.67
viguetas X 500 Khz			viguetas X 100 Khz		
	tg	long		tg	long
media	1451.31	3904.75	media	1390.75	3863.51
desviación	198.63	342.68	desviación	118.89	310.79
CV%	13.69	8.78	CV%	8.55	8.04

Tabla N° 7: Velocidades en viguetas			Tabla N° 8: Velocidades en viguetas		
Rodela A			Rodela A		
500 Khz	VELOCIDADES m/s		100 Khz	VELOCIDADES m/s	
	tg	long		tg	long
Y1	1051.83	4350.79	Y1	1094.74	4053.66
Y2	922.39	4119.40	Y2	1003.62	3584.42
Y3	955.22	3531.91	Y3	1029.70	3487.39
Y4	1230.77	3542.74	Y4	1249.25	3684.44
Y5	1558.05	3772.73	Y5	1316.46	3738.74
Y6	1586.67	3267.72	Y6	1055.77	3373.98
Y7	1312.30	3905.66	Y7	1357.26	3763.64
Y8	1145.23	4049.02	Y8	1258.36	3754.55
Y9	1329.05	4108.91	Y9	1254.55	3547.01
Y10	1240.24	3780.82	Y10	1304.90	3450.00
Y11	1451.67	3338.71	Y11	1507.30	3478.99
Y12	1687.89	3798.17	Y12	1752.67	2653.85
Y13	1555.13	3062.96	Y13	1549.24	3074.35
Y14	1455.52	3523.40	Y14	1487.27	3508.47
Y15	1369.13	4109.45	Y15	1444.25	3093.63
Y16	1312.90	4019.51	Y16	1330.07	3404.96
Y17	1454.55	3568.97	Y17	1269.05	3407.41
Y18	1341.50	3624.45	Y18	1146.65	3593.07
Y19	1349.67	3329.32	Y19	1048.22	3356.28
Y20	1472.27	3267.72	Y20	985.63	3387.76
Y21	1475.00	3472.80	Y21	1414.38	3401.64
Y22	1689.80	2992.81	Y22	1510.95	3409.84
Y23	1564.39	3346.77	Y23	1372.09	3192.31
Y24	1156.42	3040.29	Y24	1223.04	3155.89
Y25	1096.69	3000.00	Y25	1174.47	3000.00
Y26	1186.25	3139.62	Y26	1179.49	3354.84
Y27	1276.66	3825.69	Y27	1274.69	3641.92
viguetas Y 500 Khz			viguetas Y 100 Khz		
	tg	long		tg	long
media	1341.75	3588.53	media	1281.26	3427.89
desviación	202.89	383.58	desviación	184.22	276.47
CV%	15.12	10.69	CV%	14.38	8.07

Tabla N° 9: Velocidades en viguetas			Tabla N° 10: Velocidades en viguetas		
Rodela B			Rodela B		
500 KHz	VELOCIDADES m/s		100 KHz	VELOCIDADES m/s	
	tg	l		tg	l
X1	1330.94	4275.00	X1	1355.31	3800.00
X2	1269.42	3976.70	X2	1324.01	3413.33
X3	1760.95	3565.22	X3	1323.08	3190.66
X4	1760.00	3405.00	X4	1351.37	3462.71
X5	1683.64	4059.41	X5	1419.16	3474.58
X6	1296.50	3690.09	X6	1343.48	3577.29
X7	1203.90	4162.44	X7	1252.79	3580.79
X8	1427.36	4238.34	X8	1150.31	3651.79
X9	1205.88	4293.19	X9	1234.11	4183.67
X10	1273.48	3692.31	X10	1321.58	3692.31
X11	1399.23	3865.40	X11	1432.28	3811.21
X12	1364.20	3835.86	X12	1404.84	3854.03
X13	1335.66	3876.19	X13	1384.06	3463.83
X14	1319.79	3539.39	X14	1275.87	3420.92
X15	1108.62	4130.65	X15	1141.42	3770.64
X16	1291.33	3833.64	X16	1328.99	3582.53
X17	1261.69	3721.27	X17	1295.33	3721.27
X18	1621.44	4045.54	X18	1687.55	3664.57
X19	1280.13	4009.80	X19	1350.52	3572.05
X20	1731.28	3844.13	X20	1259.62	3411.67
X21	1252.48	3878.67	X21	1326.78	3720.00
viguetas X 500 KHz			viguetas X 100 KHz		
	tg	long		tg	long
media	1389.43	3901.82	media	1331.55	3619.99
desviación	193.47	240.67	desviación	108.82	204.71
CV %	13.92	6.17	CV %	8.17	5.66

Tabla N° 11: Velocidades en viguetas			Tabla N° 12: Velocidades en viguetas		
Rodela B			Rodela B		
500 KHz	VELOCIDADES m/s		100 KHz	VELOCIDADES m/s	
	tg	long		tg	long
Y1	1327.90	4369.33	Y1	1281.89	4171.13
Y2	1178.64	3982.27	Y2	1253.00	3648.01
Y3	1662.45	4021.78	Y3	1397.16	3402.01
Y4	1800.46	4200.00	Y4	1395.04	3917.31
Y5	1359.59	4296.84	Y5	1408.23	3807.84
Y6	1361.94	3889.52	Y6	1329.73	3926.92
Y7	969.38	4092.46	Y7	991.41	3688.41
Y8	1041.27	4378.49	Y8	1088.80	3668.47
Y9	1341.74	3883.81	Y9	1328.16	3310.06
Y10	1296.53	4308.99	Y10	1350.09	3635.71
Y11	1456.98	3532.17	Y11	1355.98	3249.60
Y12	1469.91	3542.11	Y12	1448.25	2867.90
Y13	1496.58	3732.72	Y13	1574.40	3756.96
Y14	1260.41	3830.19	Y14	1336.93	3918.92
Y15	1344.35	3475.21	Y15	1374.48	3176.56
Y16	1207.23	3880.00	Y16	1309.80	3423.53
Y17	1189.16	3883.81	Y17	1259.33	4432.61
Y18	950.96	3858.49	Y18	1232.40	3287.78
Y19	1367.88	3883.81	Y19	1370.24	3561.57
Y20	1328.00	3668.47	Y20	1029.46	3393.33
Y21	1341.81	3698.18	Y21	1326.28	3482.88
Y22	1284.90	3434.60	Y22	1314.15	3095.06
Y23	1284.04	3279.03	Y23	1296.33	3057.14
Y24	1226.39	3846.45	Y24	1231.93	3792.52
Y25	1261.54	4143.59	Y25	1299.52	3591.11
viguetas Y 500 KHz			viguetas Y 100 KHz		
	tg	long		tg	long
media	1312.40	3884.49	media	1303.32	3570.53
desviación	182.41	293.60	desviación	122.27	353.59
CV%	13.90	7.56	CV%	9.38	9.90

Tabla N° 13: Velocidades en probetas				Tabla N° 14: Velocidades en probetas			
Rodela A				Rodela A			
500 KHz	VELOCIDADES m/s			100 KHz	VELOCIDADES m/s		
	tg	l	r		tg	l	r
X1	1351.31	4165.00	1346.34	X1	1364.69	3874.42	1194.81
X2	1305.03	3559.83	1304.17	X2	1340.87	3456.43	1199.23
X3	1262.52	3510.55	1289.47	X3	1318.54	3314.74	1304.18
X4	1857.14	3200.00	1358.02	X4	1467.37	3423.87	1231.34
X5	1419.08	3120.30	1237.92	X5	1372.32	3346.77	1305.88
X6	1799.14	3547.01	1515.42	X6	1562.85	3429.75	1387.10
X7	1770.21	3586.21	1422.41	X7	1549.35	3438.02	1352.46
X8	1511.84	3216.22	1535.09	X8	1479.50	3529.66	1388.89
X9	1445.03	3386.18	1334.76	X9	1271.89	3073.80	1317.80
X10	1210.83	3058.82	1489.88	X10	1323.20	3092.94	1812.81
X11	1264.93	2971.43	1869.57	X11	1416.81	2971.43	1977.01
X12	1414.09	3717.49	1940.59	X12	1485.56	3263.78	2074.07
X13	1435.99	3595.65	1819.91	X13	1522.94	4329.84	2109.89
X14	1533.46	4170.85	1852.63	X14	1513.76	3074.07	1852.63
X15	1440.00	3834.10	1921.35	X15	1475.94	3633.19	1954.29
X16	1278.46	3306.77	1746.27	X16	1316.96	3487.39	1444.44
X17	1246.25	3379.59	1394.62	X17	1023.43	3066.67	1244.00
X18	1083.55	3700.89	1525.58	X18	1092.11	3316.00	1171.43
X19	1195.09	3833.33	1497.80	X19	1217.97	3584.42	1278.20
X20	1358.55	3397.54	1355.73	X20	1407.16	3497.89	1329.46
X21	1277.95	3316.00	1473.03	X21	1316.80	3342.74	1354.96
X22	1362.13	3789.95	1304.72	X22	1382.80	3443.98	1333.33
probetas X 500 KHz				probetas X 100 KHz			
	tg	long	rad		tg	long	rad
media	1401.03	3516.53	1524.33	media	1373.76	3408.72	1482.65
desviación	193.54	316.31	221.98	desviación	135.57	290.70	306.49
CV%	13.81	8.99	14.56	CV%	9.87	8.53	20.67

Tabla N° 15: Velocidades en probetas				Tabla N° 16: Velocidades en probetas			
Rodela A				Rodela A			
500 KHz	VELOCIDADES m/s			100 KHz	VELOCIDADES m/s		
	tg	l	r		tg	l	r
Y1	1121.29	3794.52	1144.48	Y1	1107.86	3566.52	1128.49
Y2	994.03	3464.44	1003.33	Y2	982.29	3325.30	1075.00
Y3	934.83	3051.47	1069.57	Y3	965.20	3180.08	1048.30
Y4	1260.61	3369.92	1504.85	Y4	1281.97	3588.74	1230.16
Y5	1540.74	3502.11	1483.87	Y5	1375.21	3547.01	1248.06
Y6	1630.14	3280.63	1332.17	Y6	1277.61	3217.05	1201.89
Y7	1459.65	3815.67	1564.59	Y7	1412.56	3713.00	1368.20
Y8	1440.00	3654.87	1736.84	Y8	1435.01	3529.91	1534.88
Y9	1417.81	3320.00	1815.79	Y9	1386.93	3516.95	1906.08
Y10	1449.12	3942.86	1868.85	Y10	1419.24	3312.00	1900.00
Y11	1629.19	3298.80	1922.62	Y11	1600.78	2946.62	1945.78
Y12	1876.71	2816.33	1623.85	Y12	1508.26	2456.97	1587.44
Y13	1711.30	3051.66	2005.78	Y13	1642.57	3018.25	1949.44
Y14	1672.80	3523.40	2062.89	Y14	1594.54	2925.80	2075.95
Y15	1628.74	3933.33	2089.74	Y15	1542.53	3014.60	2076.43
Y16	1433.10	3336.03	2114.65	Y16	1393.84	3109.43	2141.94
Y17	1322.53	3209.30	1900.00	Y17	1364.55	3124.53	1954.29
Y18	1266.98	2881.94	1723.62	Y18	1292.91	3108.61	1916.20
Y19	1140.88	2848.80	1444.92	Y19	982.16	2982.01	1403.29
Y20	975.12	2974.91	1289.29	Y20	965.96	3108.61	1312.73
Y21	1365.29	3360.32	1626.26	Y21	1402.38	3229.57	1129.82
Y22	1577.14	3127.82	1566.04	Y22	1544.78	3025.45	1400.84
Y23	1648.70	3040.29	1530.52	Y23	1441.54	2964.29	1393.16
Y24	1196.53	2694.81	1237.41	Y24	1275.81	2852.23	1255.47
Y25	1145.23	2629.75	1330.74	Y25	1201.74	2836.18	1257.35
Y26	1166.20	2764.12	1417.36	Y26	1201.74	3014.49	1261.03
Y27	1298.74	3232.56	1401.46	Y27	1343.09	3489.54	1356.89
probetas Y 500 KHz				probetas Y 100 KHz			
	tg	long	rad		tg	long	rad
media	1381.61	3256.32	1585.61	media	1331.22	3174.21	1520.71
desviación	242.78	364.21	308.52	desviación	194.11	284.46	351.86
CV%	17.57	11.18	19.46	CV%	14.58	8.96	23.14

Tabla N° 17: Velocidades probetas				Tabla N° 18: Velocidades en probetas			
Rodela B				Rodela B			
500 KHz	VELOCIDADES m/s			100 KHz	VELOCIDADES m/s		
	tg	l	r		tg	l	r
X1	1323.79	4124.62	1413.95	X1	1333.33	3664.29	1224.16
X2	1291.61	3485.96	1392.28	X2	1321.65	3413.33	1392.28
X3	1748.46	3565.22	1400.00	X3	1347.18	3228.35	1292.31
X4	1816.22	3095.45	1517.86	X4	1346.45	3217.32	1399.18
X5	1664.72	3727.27	1446.15	X5	1464.03	3504.27	1318.08
X6	1294.24	3531.03	1251.91	X6	1319.57	3413.33	1197.08
X7	1231.95	3445.38	1329.23	X7	1215.76	3416.67	1234.29
X8	1242.95	4131.31	1590.43	X8	1236.73	3651.79	1390.79
X9	1332.13	3942.31	1794.97	X9	1320.21	3534.48	1841.24
X10	1355.72	3709.09	1858.29	X10	1360.74	3303.64	1935.71
X11	1401.93	3673.87	1773.66	X11	1410.08	3262.40	1874.23
X12	1412.73	3551.09	1883.64	X12	1397.04	3176.56	1512.41
X13	1446.97	4111.11	1897.78	X13	1428.04	3434.60	1887.29
X14	1317.53	3570.31	1873.45	X14	1297.46	3323.58	1487.00
X15	1380.32	4326.32	1684.42	X15	1292.46	3558.44	1451.08
X16	1421.65	4143.43	1524.64	X16	1366.49	3536.21	1447.71
X17	1363.51	3992.23	1779.10	X17	1293.18	3484.75	1380.69
X18	1652.10	4005.88	1466.09	X18	1687.55	3477.45	1350.20
X19	1357.51	3556.52	1394.72	X19	1383.80	3541.13	1348.91
X20	1620.62	3454.85	1316.52	X20	1341.30	3529.31	1256.43
X21	1309.03	3589.47	1396.75	X21	1335.84	3736.99	1336.96
probetas X 500 KHz				probetas X 100 KHz			
	tg	long	rad		tg	long	rad
media	1427.89	3749.18	1570.75	media	1357.09	3448.04	1455.14
desviación	164.79	306.08	210.46	desviación	93.27	149.51	223.96
CV%	11.54	8.16	13.40	CV%	6.87	4.34	15.39
Tabla N° 19: Velocidades en probetas				Tabla N° 20: Velocidades en probetas			
Rodela B				Rodela B			
500 KHz	VELOCIDADES m/s			100 KHz	VELOCIDADES m/s		
	tg	l	r		tg	l	r
Y1	1330.07	3853.33	1268.83	Y1	1368.07	3678.18	1221.25
Y2	1269.01	3207.94	1040.75	Y2	1285.44	3340.50	1216.12
Y3	1774.77	3262.65	1271.54	Y3	1470.15	3413.45	1226.67
Y4	1776.07	3339.34	1486.89	Y4	1422.78	3467.23	1314.49
Y5	1369.04	3488.89	1264.42	Y5	1447.06	3580.70	1236.63
Y6	996.46	3551.30	1085.17	Y6	1267.63	3598.24	1178.08
Y7	979.05	3652.02	1081.19	Y7	985.19	3540.87	1153.52
Y8	1205.51	3953.40	1598.21	Y8	1235.79	3540.87	1397.65
Y9	1234.48	3577.19	1644.67	Y9	1282.74	3185.94	1327.87
Y10	1322.77	4011.82	1567.77	Y10	1378.56	3193.73	1333.87
Y11	1422.55	3343.21	1675.13	Y11	1525.15	3112.64	1422.41
Y12	1478.20	3256.45	1484.11	Y12	1102.95	2447.27	1005.06
Y13	1531.52	3648.65	1818.91	Y13	1596.75	3139.53	1997.81
Y14	1428.47	3812.21	1786.10	Y14	1462.73	3248.00	1805.41
Y15	1379.24	3445.76	1776.60	Y15	1438.99	3092.02	1865.92
Y16	1329.35	3807.48	1851.69	Y16	1372.60	3380.91	1562.09
Y17	1259.33	3921.15	1611.65	Y17	1305.12	3608.85	1355.10
Y18	993.97	3366.26	1161.37	Y18	1217.23	3182.88	1202.58
Y19	1346.94	3455.93	1179.59	Y19	1333.33	3412.55	1223.37
Y20	1012.45	3787.91	1118.97	Y20	1002.26	3495.28	1204.15
Y21	1319.74	3117.24	1052.63	Y21	1306.84	3129.23	1184.67
Y22	1258.88	3095.06	1186.31	Y22	1289.00	3071.70	1147.06
Y23	1231.52	3080.30	1157.09	Y23	1260.16	3176.56	1122.15
Y24	1186.51	3559.65	1343.09	Y24	1233.79	3410.08	1270.77
Y25	1242.42	3482.76	1149.32	Y25	1291.34	3706.42	1305.84
probetas Y 500 KHz				probetas Y 100 KHz			
	tg	long	rad		tg	long	rad
media	1307.09	3523.12	1386.48	media	1315.27	3326.15	1331.22
desviación	199.37	272.02	267.29	desviación	142.40	264.63	234.64
CV%	15.25	7.72	19.28	CV%	10.83	7.96	17.63

Tabla N° 21: Velocidades promedio viguetas

VIGUETAS X		
500 Khz	tg	long
MEDIA	1421.09	3903.32
DESV	198.55	297.27
C.V.	13.97	7.62
VIGUETAS Y		
500 Khz	tg	long
MEDIA	1327.64	3730.82
DESV	193.87	373.77
C.V.	14.60	10.02
VIGUETAS X		
100 Khz	tg	long
MEDIA	1361.83	3744.58
DESV	117.86	291.04
C.V.	8.65	7.77
VIGUETAS Y		
100 Khz	tg	long
MEDIA	1291.87	3486.47
DESV	157.89	323.84
C.V.	12.22	9.26

Tabla N° 22: Velocidades promedio probetas

PROBETAS X			
500 Khz	tg	long	rad
MEDIA	1414.15	3630.15	1547.00
DESV	180.57	332.36	217.67
PROBETAS Y			
500 Khz	tg	long	rad
MEDIA	1345.78	3384.59	1489.87
DESV	226.05	349.60	306.05
PROBETAS X			
100 Khz	tg	long	rad
MEDIA	1365.62	3427.92	1469.21
DESV	117.14	233.54	269.71
PROBETAS Y			
100 Khz	tg	long	rad
MEDIA	1323.55	3247.26	1429.61
DESV	171.40	285.39	315.78

Tabla N° 23: velocidades CUBO A (m/s)																	
CARA LONGITUDINAL																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	4020	4090	4062	3940	3405	3405	3455	3185	3198	3224	4314	4387	4378	4252	4222	4222	1
2	4126	4140	4111	4069	3329	3220	3101	3172	3189	3920	5425	4346	4362	4283	4268	4268	2
3	4453	4192	4184	4184	4014	3844	3460	3142	3831	4062	4069	4291	4322	4314	4307	4299	3
4	4487	4478	4162	3933	3927	3869	3806	3734	3856	3837	3875	4177	4283	4299	4307	4275	4
5	4470	4314	4314	4014	3933	3850	3794	3752	3844	3813	4104	4000	4133	4222	4268	4207	5
6	4322	3901	4214	4055	3980	3856	3806	3752	3831	3882	3946	3966	3837	4126	4133	4403	6
7	4014	3794	3980	4090	4119	4148	4041	3782	3794	3940	3973	3973	3758	4097	4126	4354	7
8	4436	4387	4192	4140	4090	4148	4090	3907	3722	3927	3966	3705	4097	4177	4133	4322	8
9	4428	4378	4283	4222	4252	4192	4104	3927	3717	3907	3986	4140	4184	4177	4199	4307	9
10	4487	4378	4283	4214	4177	4140	4034	3882	2924	4076	4119	4126	4170	4275	4307	4260	10
11	4436	4370	4330	4260	4395	4214	4111	4090	4041	4177	4229	4252	4268	4307	4314	4148	11
12	4574	4495	4428	4411	4436	4395	4275	4192	4148	4245	4268	4322	4370	4260	4199	4199	12
13	4574	4504	4387	4387	4411	4395	4097	4177	4148	4314	4314	4362	4370	4260	4199	4199	13
14	4090	4170	4299	4177	4119	4119	3882	4090	4048	4229	4291	4354	4362	4322	4245	3614	14
15	4041	4140	4199	4207	4155	4111	3920	3670	3693	4119	4245	4268	4252	3592	3625	3592	15
16	3986	4069	4041	3882	3746	3565	3914	3907	3758	3089	3138	3450	3528	3587	3592	3581	16
max		5425		min		2924		media		4068							

Tabla N° 24: velocidades CUBO A (m/s)																	
CARA RADIAL																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1316	1340	1345	1358	1556	1590	1600	1600	1597	1586	1373	1338	1299	1272	1250	1208	1
2	1373	1373	1453	1471	1559	1566	1674	1702	1702	1615	1397	1358	1330	1274	1254	1235	2
3	1384	1392	1459	1501	1549	1633	1690	1714	1710	1706	1556	1378	1345	1285	1263	1252	3
4	1384	1392	1408	1483	1520	1651	1694	1714	1714	1706	1495	1392	1348	1321	1290	1265	4
5	1381	1389	1411	1486	1489	1633	1690	1702	1710	1702	1486	1384	1345	1323	1290	1265	5
6	1376	1389	1471	1486	1492	1618	1648	1686	1702	1698	1489	1345	1333	1313	1290	1270	6
7	1365	1381	1465	1477	1477	1576	1583	1644	1663	1667	1474	1353	1340	1318	1299	1267	7
8	1365	1381	1400	1477	1419	1471	1501	1507	1498	1480	1462	1436	1343	1318	1290	1270	8
9	1360	1378	1400	1486	1480	1456	1441	1489	1501	1483	1447	1378	1348	1325	1283	1265	9
10	1358	1381	1400	1483	1483	1441	1419	1539	1543	1536	1447	1371	1343	1318	1281	1261	10
11	1229	1276	1474	1474	1436	1459	1530	1539	1530	1483	1353	1335	1309	1276	1261	1263	11
12	1212	1223	1261	1285	1321	1450	1444	1546	1546	1530	1520	1365	1335	1313	1285	1270	12
13	1198	1198	1187	1274	1444	1447	1413	1569	1566	1539	1536	1363	1338	1316	1297	1279	13
14	1189	1189	1183	1285	1333	1335	1358	1376	1573	1539	1501	1363	1343	1313	1285	1272	14
15	1190	1189	1185	1263	1318	1318	1350	1363	1384	1386	1381	1297	1292	1285	1274	1252	15
16	1187	1175	1173	1241	1297	1288	1338	1338	1376	1371	1365	1316	1279	1281	1279	1254	16
max		1714		min		1173		media		1409							

Tabla N° 25: velocidades CUBO A (m/s)																	
CARA TANGENCIAL																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1404	1404	1384	1364	1361	1375	1378	1395	1477	1493	1490	1473	1413	1375	1344	1315	1
2	1587	1602	1602	1535	1535	1521	1416	1465	1503	1531	1535	1521	1435	1392	1339	1264	2
3	1602	1614	1622	1587	1568	1557	1463	1497	1671	1671	1557	1531	1460	1413	1364	1289	3
4	1610	1618	1614	1602	1579	1571	1470	1497	1679	1675	1542	1521	1467	1425	1352	1284	4
5	1618	1622	1614	1598	1583	1571	1483	1671	1671	1675	1535	1507	1460	1372	1320	1255	5
6	1587	1594	1590	1568	1557	1528	1463	1630	1630	1630	1473	1451	1375	1352	1277	1211	6
7	1618	1618	1598	1579	1553	1542	1470	1606	1610	1626	1447	1389	1369	1347	1236	1051	7
8	1662	1654	1634	1583	1557	1542	1560	1594	1598	1610	1422	1372	1358	1325	1181	1043	8
9	1675	1658	1642	1571	1538	1531	1531	1575	1575	1398	1384	1352	1341	1267	1100	1029	9
10	1684	1662	1614	1557	1517	1507	1510	1538	1546	1369	1352	1339	1302	1183	1070	1012	10
11	1671	1671	1606	1535	1500	1490	1493	1505	1503	1325	1336	1320	1191	1104	1031	994	11
12	1483	1480	1598	1493	1463	1463	1447	1361	1372	1302	1304	1183	1122	1039	1011	987	12
13	1126	1553	1568	1463	1441	1435	1419	1398	1366	1355	1336	1299	1279	1215	987	955	13
14	1124	1260	1451	1435	1429	1410	1389	1389	1352	1331	1310	1272	1238	1009	973	944	14
15	1106	1260	1277	1395	1410	1395	1392	1366	1341	1323	1299	1294	1100	1102	1077	1061	15
16	1098	1262	1279	1392	1395	1395	1404	1364	1336	1315	1302	1279	1082	1095	1058	1065	16
max		1684		min		944		media		1415							

Tabla N° 26: velocidades CUBO B (m/s)																	
CARA LONGITUDINAL																	
	1v	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16v	
1	3412	3892	3976	3693	3351	2975	2921	2928	3858	4088	4153	4262	4290	4545	3768	3790	1
2	3457	3846	3704	3316	3316	3030	2784	3801	3683	3963	4114	4167	4235	4577	4437	3869	2
3	3757	3504	3385	3725	3693	3448	3226	3662	3736	4037	4140	4167	4221	4514	4437	4545	3
4	3621	3683	3210	3258	3672	3403	3430	3725	3801	3976	4101	4221	4235	4498	4422	4530	4
5	3495	3611	3683	3275	3299	3495	3118	3714	3421	3892	4088	4221	4221	4498	4498	4610	5
6	3514	3514	3562	3693	3202	3037	3023	3275	3299	3824	3448	3835	4262	4483	4561	4610	6
7	3976	4101	3439	3118	3073	3044	2961	3316	3308	3394	3421	4207	4262	4498	4498	3779	7
8	4034	4025	3963	3963	3916	3439	3266	3403	3351	4088	3258	4194	4248	4498	4452	3591	8
9	4088	4088	4088	4114	4025	3457	3394	3736	3892	4012	3704	4127	4153	4407	4101	3976	9
10	4305	4305	4088	4140	4063	3892	3403	3581	3858	4037	3779	3757	4235	4437	3467	3118	10
11	4392	4362	4167	4207	4101	3916	3779	3591	3514	3662	3714	4392	4235	4422	2731	2230	11
12	3976	4392	4262	4235	4114	3916	3779	3746	3504	4153	4290	3939	4000	2870	2708	2510	12
13	3133	4153	4101	4101	3963	3801	2448	2549	2948	3210	3242	3333	3299	3016	2703	2534	13
14	3110	3118	3016	2948	3581	2637	2439	2495	2515	2600	2928	3218	3133	3403	3283	2559	14
15	3155	3088	2989	2995	2935	2796	2658	2549	2584	2658	2658	3242	3202	3210	3194	2448	15
16	3009	3073	2989	3052	2928	2838	2889	2725	2610	2658	2826	3186	3110	3202	3194	3081	16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
max		4610		min		2230		media		3615							

Tabla N° 27: velocidades CUBO B (m/s)																	
CARA RADIAL																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1169	1201	1233	1091	1197	1438	1441	1454	1386	1386	1360	1318	1285	1272	1267	1175	1
2	1195	1217	1257	1287	1419	1454	1474	1481	1477	1481	1444	1474	1300	1282	1265	1173	2
3	1208	1238	1275	1357	1425	1471	1484	1505	1515	1515	1494	1484	1310	1292	1262	1243	3
4	1215	1245	1280	1357	1410	1461	1494	1526	1544	1548	1512	1508	1327	1305	1282	1204	4
5	1224	1257	1285	1354	1401	1451	1494	1533	1563	1559	1537	1526	1332	1300	1287	1280	5
6	1208	1257	1282	1297	1398	1448	1474	1566	1585	1582	1582	1574	1337	1303	1290	1282	6
7	1206	1252	1295	1318	1371	1404	1438	1597	1593	1585	1585	1582	1548	1303	1287	1248	7
8	1193	1270	1295	1324	1357	1368	1389	1609	1593	1585	1582	1566	1332	1300	1240	1226	8
9	1190	1208	1292	1303	1305	1343	1346	1363	1593	1585	1582	1570	1548	1297	1250	1229	9
10	1163	1195	1217	1238	1252	1313	1327	1327	1589	1585	1570	1559	1357	1316	1231	1300	10
11	1150	1163	1215	1231	1224	1233	1210	1389	1574	1574	1563	1422	1368	1343	1318	1297	11
12	1109	1148	1173	1210	1208	1210	1199	1169	1380	1481	1491	1477	1448	1363	1324	1262	12
13	1107	1128	1148	1171	1188	1188	1190	1167	1392	1451	1498	1494	1477	1383	1316	1272	13
14	1076	1111	1144	1150	1165	1175	1173	1078	1082	1491	1522	1515	1484	1419	1346	1267	14
15	1071	1102	1127	1136	1165	1180	1071	1066	1076	1515	1512	1505	1474	1416	1165	1150	15
16	1078	1105	1134	1148	1167	1014	1012	1022	1052	1287	1471	1236	1210	1186	1155	1138	16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
max		1609		min		1012		media		1331							

Tabla N° 28: velocidades CUBO B (m/s)																	
CARA TANGENCIAL																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1958	1946	1935	1658	1548	1461	1484	1494	1548	1551	1544	1467	1413	1377	1222	1178	1
2	1982	1976	1952	1662	1578	1533	1508	1529	1555	1559	1544	1505	1461	1407	1272	1248	2
3	1976	1935	1895	1771	1738	1529	1544	1559	1563	1548	1544	1508	1457	1270	1272	1275	3
4	1952	1929	1912	1884	1786	1752	1693	1559	1566	1559	1548	1487	1457	1275	1292	1386	4
5	1929	1917	1895	1879	1786	1613	1566	1563	1563	1555	1540	1474	1438	1407	1250	1252	5
6	1906	1895	1884	1862	1776	1629	1566	1563	1559	1533	1505	1464	1422	1248	1215	1250	6
7	1890	1879	1862	1847	1762	1625	1621	1563	1548	1529	1487	1451	1416	1380	1197	1290	7
8	1935	1929	1912	1831	1747	1629	1625	1555	1529	1505	1467	1444	1404	1089	1243	1270	8
9	1884	1868	1847	1796	1762	1650	1637	1578	1537	1508	1487	1457	1248	1109	1248	1267	9
10	1847	1847	1826	1776	1738	1621	1582	1526	1494	1471	1531	1250	1236	1102	1125	1270	10
11	1862	1806	1791	1743	1646	1617	1544	1471	1275	1204	1201	1182	1062	1094	1111	1125	11
12	1836	1806	1762	1720	1641	1601	1505	1419	1398	1157	1146	1113	1024	1037	1094	1105	12
13	1826	1801	1757	1667	1641	1533	1501	1392	1178	1136	1038	1064	1002	1014	1105	1109	13
14	1816	1801	1747	1671	1633	1537	1366	1346	1094	1025	1016	941	952	973	989	1014	14
15	1796	1786	1733	1641	1629	1477	1346	1305	1104	1043	983	935	948	967	976	1028	15
16	1165	1252	1368	1498	1498	1287	1208	1316	1087	1067	1057	986	954	985	1020	1040	16
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
max		1982		min		935		media		1481							

Tabla N° 29: velocidades CUBO C (m/s)																	
CARA LONGITUDINAL																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	2748	2857	2778	2802	2796	3125	3148	2908	3081	3148	3140	3234	3325	3812	3812	3725	1
2	2778	2708	2754	3081	3377	3412	3186	2982	3163	3186	3202	3030	3377	3846	3801	3736	2
3	2680	2680	3110	3171	3226	3476	3210	3037	3704	3704	3704	3662	3779	3869	3662	3641	3
4	2908	3291	3495	3514	3140	3171	2995	3641	3714	3714	3704	3693	3652	3495	3725	3693	4
5	3266	3359	3542	3533	3476	3095	3308	3693	3714	3746	3757	3757	3283	3467	3693	3693	5
6	3467	3533	3523	3704	3641	3258	2989	3652	3704	3662	3652	3858	3368	3242	2857	2838	6
7	2826	3140	3095	3030	3171	2743	2772	3218	3652	3652	3662	3652	3621	3140	3044	2549	7
8	2720	2870	2697	2680	2675	3073	3325	2539	3652	3714	3736	3725	3266	3023	2895	2605	8
9	2595	2626	2569	2462	2444	2462	2574	3562	3693	3757	3768	3163	3073	2989	2708	2653	9
10	2569	2579	2549	2495	2500	2616	2714	2826	2995	3044	3095	3148	3178	3403	3385	3351	10
11	3457	2616	2584	2544	2515	3155	2743	3448	3514	3601	3621	3571	3581	3342	3601	3591	11
12	3325	3044	2595	3514	3421	3412	3439	3514	3601	3641	3641	3652	3662	3704	3714	3916	12
13	2574	3412	3351	3542	3757	3672	3533	3601	3672	3652	3693	3683	4063	3939	3963	3869	13
14	2595	2600	3333	3377	3368	3631	3377	3275	3377	3421	3514	3812	3768	3779	3533	3533	14
15	2539	2590	3186	3325	3351	3266	3394	3385	3377	3359	3846	3693	3662	4180	3266	3457	15
16	2471	2595	3210	3266	3291	3242	3368	3430	3412	3439	3714	3631	3611	4000	3283	3412	16
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
max	4180		min	2444				media	3296								

Tabla N° 30: velocidades CUBO C (m/s)																	
CARA RADIAL																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1150	1178	1195	1128	1260	1410	1419	1425	1389	1386	1265	1229	1197	1178	1165	1105	1
2	1188	1199	1252	1310	1389	1410	1487	1501	1501	1464	1349	1340	1217	1184	1167	1117	2
3	1199	1217	1262	1360	1389	1467	1498	1494	1498	1498	1422	1357	1229	1193	1169	1157	3
4	1201	1220	1243	1351	1366	1471	1505	1505	1515	1512	1401	1349	1238	1215	1190	1144	4
5	1206	1224	1248	1351	1349	1457	1505	1505	1522	1515	1407	1351	1238	1215	1193	1178	5
6	1195	1224	1272	1321	1349	1448	1474	1512	1529	1522	1425	1349	1236	1210	1195	1182	6
7	1190	1220	1310	1329	1354	1389	1410	1505	1515	1512	1422	1354	1360	1213	1197	1165	7
8	1184	1226	1248	1332	1321	1327	1349	1467	1457	1425	1413	1395	1298	1213	1173	1157	8
9	1180	1197	1245	1324	1324	1332	1327	1332	1395	1425	1407	1366	1340	1215	1173	1157	9
10	1165	1190	1210	1255	1262	1310	1270	1335	1425	1351	1401	1357	1248	1220	1165	1184	10
11	1104	1130	1238	1248	1229	1243	1257	1366	1464	1422	1349	1272	1236	1210	1193	1184	11
12	1078	1100	1128	1157	1171	1226	1220	1240	1366	1404	1404	1272	1248	1236	1206	1173	12
13	1071	1080	1083	1134	1213	1215	1201	1248	1380	1395	1416	1277	1260	1245	1208	1182	13
14	1052	1067	1080	1128	1157	1163	1171	1128	1199	1357	1354	1285	1265	1260	1215	1175	14
15	1050	1064	1073	1113	1150	1157	1115	1117	1130	1297	1292	1248	1270	1243	1130	1115	15
16	1052	1059	1071	1109	1142	1060	1078	1083	1113	1231	1270	1182	1155	1144	1128	1109	16
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
max	1529		min	1050				media	1271								

Tabla N° 31: velocidades CUBO C (m/s)																	
CARA TANGENCIAL																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	1658	1654	1636	1518	1470	1438	1450	1465	1534	1545	1539	1493	1435	1397	1300	1262	1
2	1788	1795	1785	1620	1580	1550	1483	1519	1552	1568	1563	1536	1470	1421	1325	1275	2
3	1795	1785	1773	1699	1673	1567	1525	1550	1640	1632	1574	1543	1481	1359	1337	1301	3
4	1790	1785	1776	1757	1701	1681	1597	1550	1646	1640	1568	1527	1484	1367	1342	1353	4
5	1785	1783	1769	1752	1703	1616	1547	1640	1640	1638	1561	1513	1471	1410	1304	1273	5
6	1757	1757	1750	1727	1684	1600	1536	1620	1618	1604	1511	1479	1419	1318	1264	1249	6
7	1769	1764	1745	1727	1675	1606	1565	1608	1602	1600	1489	1441	1413	1384	1235	1175	7
8	1814	1807	1788	1723	1671	1608	1616	1599	1587	1580	1466	1429	1401	1215	1229	1162	8
9	1800	1783	1764	1701	1667	1612	1606	1600	1580	1473	1455	1424	1313	1201	1186	1152	9
10	1788	1776	1739	1684	1644	1585	1568	1556	1543	1439	1458	1313	1288	1159	1113	1143	10
11	1788	1762	1718	1656	1593	1574	1541	1511	1401	1281	1285	1267	1141	1116	1086	1071	11
12	1665	1650	1701	1622	1570	1552	1498	1410	1406	1244	1240	1165	1087	1054	1067	1058	12
13	1412	1692	1681	1581	1557	1505	1481	1416	1285	1256	1188	1189	1142	1123	1058	1042	13
14	1407	1503	1608	1567	1547	1493	1399	1388	1229	1177	1163	1099	1094	1006	996	993	14
15	1387	1498	1491	1530	1534	1457	1390	1356	1230	1185	1138	1104	1034	1046	1040	1061	15
16	1148	1276	1342	1465	1466	1360	1319	1360	1218	1197	1185	1132	1030	1053	1055	1068	16
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
max	1814		min	993				media	1463								

