



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ACÚSTICA

TRABAJO FIN DE MASTER

Determinación del módulo de elasticidad de la madera de chopo y nogal en árboles en pie mediante ondas acústicas

REALIZADO POR:
María Rodríguez Marcos

TUTORAS:
Dra. Elisabet Suárez Vargas
Dpto. Construcciones Arquitectónicas UGR

Dra. María Ángeles Ripoll Morales
IFAPA Camino Purchil

Curso 2019/20

DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA MADERA DE CHOPO Y NOGAL EN ÁRBOLES EN PIE MEDIANTE ONDAS ACÚSTICAS

MARÍA RODRÍGUEZ MARCOS

Tutoras: ELISABET SUÁREZ VARGAS y MARIA ÁNGELES RIPOLL MORALES

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ACÚSTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER 2020



Resumen

El empleo de la madera como alternativa de construcción sostenible se está extendiendo. La construcción es uno de los sectores más contaminante, con alto impacto medio ambiental. El uso de madera es una gran oportunidad para reducir la huella de carbono del sector y para conseguir una construcción de consumo energético casi nulo. Para generalizar su utilización, existen dos objetivos principales, conseguir madera de calidad y tener un abastecimiento continuo, evitando épocas de escasez. En otras palabras, es necesario optar por especies arbóreas plantadas de crecimiento rápido, con buena silvicultura y alta rentabilidad de las plantaciones.

La calidad de la madera, definida entre otras propiedades por la densidad, la orientación de las fibras, la resistencia mecánica y la rigidez tiene una importancia fundamental en el uso final de esa madera y, por tanto, en el precio de las plantaciones forestales. La velocidad de propagación de las ondas acústicas se ha convertido en uno de los métodos no destructivos más populares para evaluar la calidad de la madera en árboles en pie. En este trabajo se ha utilizado este método acústico para caracterizar varias plantaciones de chopos y nogales, determinando el módulo elástico, analizando su evolución con el tiempo y realizando comparaciones según la edad y el clon.

Palabras clave: caracterización acústica, ensayos acústicos no destructivos, velocidad de propagación, MoE, madera, chopos, nogales

Abstract

The construction sector is one of the most pollutant sectors, with a high environmental impact. Using wood becomes a great opportunity to reduce carbon footprint of the sector and to achieve net-zero energy buildings. The main goals to become material of common uses are to obtain high quality wood and to have a continuous supply, avoiding times of shortage. In other words, it is necessary to choose fast-growing trees, with good silviculture and high profitability of the plantations.

The wood quality depends on properties as density, fibril angle, mechanical resistance and stiffness. The final use of the wood and the price of the plantation are based on the quality. The propagation velocity of acoustic waves is among the non-destructive testing most commonly used to evaluate the quality of wood in standing trees. In this study, the acoustic method has been used to characterize poplar and walnut plantations, determining their elastic moduli, evaluating its evolution over the time and making comparisons according to age and clone.

Keywords: acoustic characterization, non-destructive acoustic testing, propagation velocity, MoE, wood, poplars, walnuts

Este trabajo ha recibido la financiación de:

Proyecto SELVIAGROTEC (Evaluación de la calidad de la madera de cultivos forestales de chopo y nogal con métodos no destructivos: efecto de la especie, el clon, tipo de plantación y la estrategia de riego) financiado por la Junta de Andalucía (código **PP.AVA2019.047**) y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) que cofinancia al 80% dentro del Programa Operativo de Andalucía 2014-2020.

En dicho proyecto participan tanto el IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía) como el Grupo de Investigación IDIE-ADIME (Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Edificación, unidad de Acústica y Diagnóstico de Materiales y Estructuras) de la Universidad de Granada.

Proyecto COMPOP__Timber (Desarrollo de productos de ingeniería elaborados a base de tablones y chapas de chopo con inserciones de material compuesto para su uso en construcción) financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad (código **BIA2017-82650-R**; Proyecto con fondos de la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Proyecto concedido al Grupo de Investigación ADIME (Acústica y Diagnóstico de Materiales y Estructuras) de la Universidad de Granada.



Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer su ayuda a mis compañeros de IDIE durante todo el proceso.

A la Escuela Técnica Superior de Edificación y al IFAPA por permitirme la utilización de sus instalaciones para la realización de los ensayos. A la Universidad de Granada, por la oportunidad de introducirme en el mundo de la investigación por medio de la beca del Plan de Formación Interna del programa ÍCARO.

Al profesor Antolino Gallego, por ofrecerme la posibilidad de colaborar en los proyectos *SELVIAGROTEC* y *COMPOP*.

Y en especial a mis tutoras, María Ángeles Ripoll y Elisabet Suárez, por su apoyo, comprensión y paciencia. Sin su inmensa colaboración, este trabajo no habría sido posible. Muchas gracias por dedicarme vuestro tiempo y enseñarme tanto.

Contenido

1.Introducción.....	15
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Motivación y contexto	15
1.3 Metodología	16
2. Estado del arte	17
2.1 La madera como material de construcción sostenible.....	17
2.2 Ensayos no destructivos mediante métodos acústicos.....	18
2.3 Velocidad de propagación, tipos de ondas y MoE (factores)	20
3. Materiales y métodos.....	23
3.1 Descripción de las plantaciones.....	23
C-I. Chopera de I-214 en Yunquera de Henares (Guadalajara).....	25
C-II. Chopera de I-214 en Granada.....	25
C-III. Chopera de Luisa Avanzo en Fuente Vaqueros (Granada).....	26
C-IV. Chopera de MC en Pedro Ruiz (Granada)	26
C-V. Chopera de MC en El Jau (Granada).....	27
C-VI. Chopera Clonal en Santa Fe (Granada)	27
C-VII. Chopera de I-214 en Guadix (Granada).....	27
N-I. Plantación de nogales híbridos Ng23xRa en Moraleda de Zafayona (Granada).....	27
N-II. Plantación de nogales híbridos Mj209xRa en el IFAPA (Granada)	28
N-III. Plantación de nogales híbridos Mj209xRa en Granada (Granada).....	28
N-IV. Plantación Clonal de nogales en Arzúa (La Coruña).....	28
N-V. Plantación Clonal de nogales en Carpio (Toledo).....	29
N-VI. Plantación Clonal de nogales en el IFAPA (Granada)	29
3.2 Métodos experimentales.....	29
3.2.1 Medida de la velocidad de transmisión de la onda acústica.....	29

3.2.2	Determinación del <i>ToF: Criterio de Akaike (AIC)</i>	32
3.2.3	Medida de la densidad en verde	33
3.2.4	Determinación del MoE.....	35
4.	Resultados de las medidas	37
C-I.	Chopera de I-214 en Yunquera de Henares (Guadalajara)	38
C-II.	Chopera de I-214 en Granada (Granada).....	39
C-III.	Chopera de Luisa Avanzo en Fuente Vaqueros (Granada).....	42
C-IV.	Chopera de MC en Pedro Ruiz (Granada).....	44
C-V.	Chopera de MC en El Jau (Granada).....	45
C-VI.	Chopera Clonal en Santa Fe (Granada).....	46
C-VII.	Chopera de I-214 en Guadix (Granada).....	50
N-I.	Plantación de nogales híbridos Ng23xRa en Moraleda de Zafayona (Granada)	51
N-II.	Plantación de nogales híbridos Mj109xRa en el IFAPA (Granada).....	53
N-III.	Plantación de nogales híbridos Mj209xRa en Granada (Granada)	55
N-IV.	Plantación Clonal de nogales en Arzúa (La Coruña).....	58
N-V.	Plantación Clonal de nogales en Carpio (Toledo)	60
N-VI.	Plantación Clonal de nogales en el IFAPA (Granada).....	62
5.	Discusión de resultados	65
5.1	Choperas	65
5.1.1	Comparación del clon I-214 de distintos verdes	65
5.1.2	Comparación del clon MC de distintos verdes	66
5.1.3	Comparación de clones de 9 verdes.....	67
5.1.4	Comparación de clones de 5 verdes	69
5.2	Nogales.....	70
5.2.1	Comparación de nogales híbridos	70
5.2.2	Comparación de nogales clonales.....	72
6.	Conclusiones.....	75
7.	Bibliografía.....	77

Lista de figuras

Figura 1. Tipos de ondas que componen una onda de volumen.....	21
Figura 2. Ubicación de las plantaciones. Color azul: Choperas; Color amarillo: Plantaciones de nogal a: Situación de las plantaciones en España. b: Situación de las plantaciones en la Vega de Granada	23
Figura 3. Plano de las plantaciones C-II y N-III.....	26
Figura 4. Plano de la plantación C-VI.....	27
Figura 5. Plano de las plantaciones N-IV, N-V y N-VI.....	28
Figura 6. a: Transductores Fakoop SD-02, b: Osciloscopio PicoScope, c: Martillo de impacto.....	30
Figura 7. Esquema experimental del ensayo de medición de ToF.....	30
Figura 8. Señal de ruido de fondo registrada en un ensayo. Señal en color azul: Emisor; Señal en color rojo: Receptor.....	31
Figura 9. Señales registradas en un ensayo. Señal en color azul: Emisor; Señal en color rojo: Receptor.....	31
Figura 10. Ejemplo de detección de ToF usando el método de Akaike.....	33
Figura 11. a: Barrena de Trepbor35. b: Barrena de Pressler.....	34
Figura 12. Proceso de extracción de las muestras para la determinación de la densidad en verde. a: Utilizando la barrena de Trepbor35 en chopos. b: Utilizando la barrena de Pressler en nogales.....	34
Figura 13. Ejemplo de muestras extraídas con barrena de chopo (izda.) y nogal (dcha.)	35
Figura 14. C-I: Resultados de la velocidad frente al DBH	39
Figura 15. C-I: Resultados del MoE frente al DBH	39
Figura 16. C-II: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	40
Figura 17. C-II: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición	41
Figura 18. C-II: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas.....	41
Figura 19. C-II: MoE en las mediciones realizadas.....	42
Figura 20. C-III: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	43
Figura 21. C-III: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición	43
Figura 22. C-III: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas	43
Figura 23. C-III: MoE en las mediciones realizadas	44
Figura 24. C-IV: Resultados de la velocidad frente al DBH	44

Figura 25. C-IV: Resultados del MoE frente al DBH.....	45
Figura 26. C-V: Resultados de la velocidad frente al DBH.....	45
Figura 27. C-V: Resultados del MoE frente al DBH	46
Figura 28. C-VI: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en diciembre de 2019	48
Figura 29. C-VI: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en junio de 2020	48
Figura 30. C-VI: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en diciembre de 2019	48
Figura 31. C-VI: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en junio de 2020.....	49
Figura 32. C-VI: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas.....	49
Figura 33. C-VI: MoE en las mediciones realizadas.....	49
Figura 34. C-VII: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	50
Figura 35. C-VII Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición...	51
Figura 36. C-VII: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas	51
Figura 37. N-I: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	52
Figura 38. N-I: Resultados del MoE frente al DBH.....	52
Figura 39. N-I: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas	53
Figura 40. N-II: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	54
Figura 41. N-II: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición.....	54
Figura 42. N-II: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas.....	54
Figura 43. N-II: MoE en las mediciones realizadas.....	55
Figura 44. N-III: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	56
Figura 45. N-III: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición ...	56
Figura 46. N-III: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas.....	56
Figura 47. N-III: MoE en las mediciones realizadas.....	57
Figura 48. N-IV: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	59
Figura 49. N-IV: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición ...	59
Figura 50. N-V: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	61
Figura 51. N-V: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición ...	61
Figura 52. N-VI: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición	63
Figura 53. N-VI: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición ...	63
Figura 54. N-VI: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas	64
Figura 55. Velocidad de propagación en chopos del clon I-214 de distintos verdes...	66

Figura 56. MoE en chopos de clon I-214 de distintos verdes.....	66
Figura 57. Velocidad de propagación en chopos del clon MC de distintos verdes.....	67
Figura 58. MoE en chopos de clon MC de distintos verdes.....	67
Figura 59. Velocidad de propagación de clones de chopo de 9 verdes.....	68
Figura 60. MoE en clones de chopo de 9 verdes.....	69
Figura 61. Velocidad de propagación en clones de chopo de 5 verdes.....	70
Figura 62. MoE en clones de chopo de 5 verdes.....	70
Figura 63. Velocidad de propagación de los nogales híbridos.....	71
Figura 64. MoE de los nogales híbridos.....	71
Figura 65. Velocidad de propagación de los nogales clonales.....	73
Figura 66. MoE de los nogales clonales.....	74

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen de los datos más significativos de las plantaciones. GR: Provincia de Granada; GU: Provincia de Guadalajara; TO: Provincia de Toledo; LC: Provincia de La Coruña. *: Chopera ya cortada	24
Tabla 2. Resumen de las medidas realizadas en cada plantación. v: Medida de velocidad. d: Medida de densidad.....	25
Tabla 3. Media y error estándar del DBH, velocidad y MoE para la plantación C-I.	38
Tabla 4. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-II. Las letras distintas (A, B, y C) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05)	40
Tabla 5. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-III. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05).....	42
Tabla 6. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-IV.....	44
Tabla 7. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-V	45
Tabla 8. Media y error estándar agrupados por clon del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-VI. Las letras distintas (A, B, y C) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05)	47
Tabla 9. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-VII. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05).....	50
Tabla 10. Datos de velocidad en septiembre de 2019 para la plantación N-I. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05).....	52
Tabla 11. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-II. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05).....	53
Tabla 12. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-III. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05).....	55
Tabla 13. Media y error estándar por clon del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-IV.....	58

Tabla 14. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-V	60
Tabla 15. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-VI.....	62
Tabla 16. Comparación estadística del clon I-214 para distintos verdes. Las letras distintas (A, B, C y D) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05)	65
Tabla 17. Comparación estadística del clon MC para distintos verdes. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05).....	67
Tabla 18. Comparación estadística de clones de chopo de 9 verdes. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05).....	68
Tabla 19. Comparación estadística de clones de chopo de 5 verdes. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05).....	69
Tabla 20. Comparación estadística de los nogales híbridos. Las letras distintas (A, B y C) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05)	71
Tabla 21. Comparación estadística de los nogales clonales según su ubicación. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05)	72
Tabla 22. Comparación estadística de los nogales clonales según el clon. Las letras distintas (A, B y C) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p-value<0,05)	73

1. Introducción

1.1 Objetivos

Este Trabajo Fin de Master tiene como objetivo principal la determinación mediante ondas acústicas el módulo de elasticidad de la madera de chopo y nogal en árboles en pie.

Los objetivos específicos se exponen a continuación:

- Validar un método no destructivo para la realización de las medidas en campo.
- Determinar las propiedades mecánicas de la madera de chopo.
- Analizar el efecto de la edad en ciertos clones de chopo y nogal mediante la comparación de la velocidad de propagación de una onda acústica y módulo de elasticidad medido en árboles en pie.
- Comparar las propiedades de distintos clones de la misma edad, tanto de chopos como de nogales, situados en distintas localizaciones.
- Analizar la variación temporal de la velocidad y el módulo de elasticidad en una misma plantación de chopos o nogales situadas en la península Ibérica.

1.2 Motivación y contexto

En el contexto actual de bioeconomía, el cultivo del chopo y nogal ofrece numerosas oportunidades para el desarrollo rural sostenible. Para ello es necesario que su madera sea de calidad y se explote de manera eficaz. Además, las plantaciones forestales son excelentes sumideros de carbono, son filtros verdes y capturan el nitrógeno y el fósforo del suelo.

Sin embargo, para que la madera se revalorice es esencial establecer protocolos y herramientas para su caracterización y clasificación que permitan buscar nuevos nichos de mercado. Actualmente, las exigencias europeas de eficiencia energética ofrecen a la madera unas oportunidades muy halagüeñas en el sector de la construcción.

El precio de compra de una plantación está directamente relacionado con la calidad de la madera, la cual depende de propiedades como la densidad, orientación de las fibras, rigidez, resistencia mecánica, etc. Para aplicaciones estructurales, es necesario seleccionar la madera en base a su rigidez (capacidad de flexión de un elemento tipo viga). Desde el punto de vista industrial y comercial, conocer la rigidez

lo antes posible tiene gran valor. De esta forma, se podrá hacer una selección de acuerdo con las necesidades finales, y una mejor valoración económica.

Para la estimación no destructiva de la rigidez en árboles en pie se puede usar la determinación de la velocidad de ondas acústicas, calculada a partir del tiempo de vuelo (método del *ToF*) de una onda generada como actuador.

1.3 Metodología

Este Trabajo Fin de Máster se estructura en 5 capítulos. En el presente Capítulo 1 se expone la introducción y los objetivos.

El Capítulo 2 muestra el estado del arte sobre la madera de chopo y nogal como material de construcción, así como de la importancia de conocer las propiedades mecánicas de la madera en árboles en pie. También se hace un repaso de los ensayos acústicos más utilizados para determinar las propiedades de la madera, especialmente su rigidez.

La medida del módulo de elasticidad de la madera de chopo y nogal se extiende a lo largo de dos capítulos. En el Capítulo 3 se describen los materiales (plantaciones) y los métodos y en el Capítulo 4 se presentan detalladamente los resultados.

El Capítulo 5 se dedica a la comparación mediante análisis estadísticos de los resultados obtenidos, siguiendo diversos criterios. Se comienza por una explicación sobre la organización del apartado, las comparaciones realizadas y el tipo de análisis utilizado.

Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo en el Capítulo 6.

2. Estado del arte

2.1 La madera como material de construcción sostenible

Actualmente en el mundo el consumo de recursos naturales no renovables es un problema. Las necesidades de la población aumentan y para satisfacerlas a largo plazo se necesitan emplear materiales sostenibles.

Uno de los sectores con mayor impacto medioambiental es la construcción, donde el uso de la madera cada vez tiene más importancia¹⁻⁴. En España, poco a poco se va introduciendo como alternativa a materiales más contaminantes y menos sostenibles. El aumento de la demanda de madera está provocando un aumento de presión en los bosques naturales que puede llegar a ser preocupante. Con el objetivo de evitarlo, la *FAO (Food and Agricultural Organization)* establece como objetivo que este año 2020 el 44% de los bosques deben ser cultivados y en el 2050 en 75% de la madera utilizada para fines industriales debe provenir de especies de crecimiento rápido⁵.

Las plantaciones forestales cada vez tienen más importancia, tanto por el aumento de la demanda y la alta rentabilidad⁶, como por mantener la agricultura en zonas donde otras alternativas agrícolas no son rentables⁷. Este tipo de plantaciones presentan otros múltiples beneficios como el secuestro de carbono, la conservación del suelo, la regulación del ciclo del agua o el aumento de la biodiversidad.⁵

La industria maderera debe consolidarse, con productos tecnológicos y rentables. Para ello, uno de los primeros objetivos que debe conseguir es tener madera de calidad con las propiedades más homogéneas posibles. Esto es complicado, la madera es un material biológico, y como consecuencia existe gran disparidad en sus propiedades incluso dentro de la misma especie.

El precio de compra de una plantación forestal depende de la calidad de la madera, de variables como la densidad, desviación de la fibra, resistencia y rigidez⁸. Tradicionalmente, el parámetro que se utilizaba para establecer la calidad de la madera era la densidad, pero a la industria de la construcción le importa más la rigidez. Por tanto, la segregación de árboles y trozas según la rigidez de su madera tiene un gran interés industrial y comercial, y como consecuencia ayuda a mejorar los beneficios económicos de la plantación⁹. La utilización de ensayos no destructivos, como los métodos acústicos, para determinar las propiedades de la madera y poder seleccionar

los árboles según las necesidades finales tiene como consecuencia inmediata el mejor aprovechamiento de la madera y el aumento de la rentabilidad de las plantaciones.

Dos de las especies con mayor demanda por agricultores e industria son el chopo y nogal. El chopo es una especie de crecimiento rápido y ciclo corto, recomendada por la *FAO* para su uso⁵. Una plantación de chopo puede tener madera de tamaño y calidad adecuada en 8 o 15 años, según la zona de la plantación. La madera de chopo es un material tecnológico, competitivo y rentable. En España en 2016 había plantadas unas 145 000 ha según la *FAO*^{5,10}. Los beneficios de este tipo de plantaciones son amplios: su cultivo mantiene la vitalidad de los ecosistemas, funciona como corredor biológico, actúa como regulador climático y tiene la capacidad de filtrar el agua que llega a los ríos. El chopo tiene una de las especies con mayores tasas de fijación de CO₂ de la atmósfera (25 t de CO₂ por ha y año), lo que la convierte en una de las mejores alternativas medioambientales. Las plantaciones de chopo si se gestionan correctamente pueden certificarse según un esquema internacional (*FSC* o *PEFC*), permitiendo obtener materia prima para uso industrial en el marco de la cadena de custodia de productos certificados.

Por otra parte, las plantaciones de nogal, aunque no son de ciclo corto puesto que tienen madera de calidad adecuada en menos de 20 años, están tomando gran relevancia con fines productores de madera en las últimas décadas, en España a finales de 2003 había aproximadamente 2000 ha de cultivo intensivo de nogales¹¹. Esto se debe a la escasez de este tipo de recursos madereros naturales, las políticas agrarias de reforestación, los beneficios ambientales y la búsqueda de alternativas productivas más rentables. El nogal es un árbol de gran interés comercial por las propiedades técnicas y estéticas de su madera.

Si se avanza en la correcta caracterización y selección de la madera proveniente de estos cultivos, los productos de ingeniería derivados del chopo y nogal pueden llegar a convertirse en productos especializados, destinados a mayores desempeños de los actuales productos de semiacabado, aumentando su rentabilidad enormemente.

2.2 Ensayos no destructivos mediante métodos acústicos

Se entiende por ensayo no destructivo (END) la prueba que proporciona información acerca del objeto ensaya sin que éste experimente ningún deterioro, tanto durante el ensayo como al finalizar éste. Por tanto, los END son aplicables en cualquier fase del proceso productivo, incluso durante la vida útil del componente o pieza a ensayar.

Todos los ensayos no destructivos están basados en principios físicos, es decir, se fundamentan en la determinación de alguna propiedad física del material o de su variación local. Sirven, por tanto, para medir de forma indirecta lo que no puede ser

medido por medidas directas, permiten caracterizar el estado y/o naturaleza de los materiales y poner de manifiesto sus discontinuidades.

En cuanto a sus aplicaciones, los ensayos no destructivos cubren, en general, tres amplias áreas:

- a) Defectología: detección de heterogeneidades, discontinuidades, posibles fallos durante el servicio, etc. El conocimiento del origen de un defecto es muy importante para llevar a cabo acciones correctivas.
- b) Caracterización de los materiales: identificación de sus propiedades y del grado de fiabilidad de los mismos, características químicas, estructurales, mecánicas, etc.
- c) Metrología: el control dimensional garantiza que los equipos estén completos, sean dimensional y geoméricamente correctos y estén montados en el orden establecido.

Este TFM se centra en la determinación de las características mecánicas que tendrá la madera cuando el árbol todavía está en pie, ofrece unas importantes ventajas competitivas: se puede establecer el uso más adecuado para esa madera, obtener la fecha óptima de corta y así aumentar la rentabilidad.

Uno de los parámetros más importantes a la hora de definir el uso de la madera es la rigidez, por tanto, es importante conocer este parámetro lo antes posible. La rigidez viene determinada por el módulo de elasticidad (MoE) y cuanto mayor sea el MoE más rígida es la madera. El módulo de elasticidad se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación.

Los métodos de ensayos no destructivos basados en acústica se centran en el estudio de la vibración mecánica de las partículas que componen el medio, en la transmisión de la onda a través del medio. En este caso concreto, mediante métodos acústicos se mide el tiempo que tarda una onda en recorrer una determinada distancia. Este dato permite obtener el valor de MoE.

Varias técnicas de ensayos no destructivos se han desarrollado para estimar la rigidez de la madera. Las técnicas acústicas son las más aplicadas por ser en general más baratas, estar bastante desarrolladas y poder aplicarse en campo¹²⁻¹⁵. Numerosos estudios han corroborado que la velocidad acústica de las ondas generadas artificialmente en madera está relacionada con sus propiedades mecánicas¹⁶⁻²⁴, convirtiéndolo en uno de los parámetros más populares para evaluar la madera en árboles en pie. La velocidad de propagación para evaluar el material se puede usar en distintas fases: en árboles en pie, en trozas tras el talado y en tablas tras el aserrado.

En árboles en pie, la velocidad de propagación se determina utilizando el tiempo de vuelo (*ToF*) que una onda elástica, generada por el impacto de un martillo, tarda en recorrer una distancia determinada²⁵. En trozas y tablones, la velocidad de

propagación se determina empleando el método de la resonancia acústica²⁰. El motivo que hace necesario utilizar distintos métodos radica en la limitación geométrica del método de la resonancia (necesita dos caras paralelas) que impide usarlo en árboles en pie.

En algunas especies la velocidad de propagación obtenida con el método *ToF* sobreestima los resultados obtenidos con el método de la resonancia o el ensayo a flexión²⁰. Aunque existe una clara correlación entre los resultados obtenidos en ensayos acústicos en las distintas fases (árbol, troza y tabla)²⁶. En el caso del chopo, las tres velocidades obtenidas son similares, aunque el MoE obtenido en árboles en pie es algo menor al obtenido en los ensayos a flexión²⁷.

La diferencia entre los valores del módulo de elasticidad longitudinal obtenido en las diferentes fases se debe a múltiples factores como son los errores de medida, la diferencia entre las técnicas utilizadas, la variabilidad de las propiedades de la madera en la sección del tronco o la presencia de defectos en la madera^{28,29}. La velocidad obtenida con el método del *ToF* está más relacionada con la madera exterior, mientras que con el método de la resonancia se evalúa la madera en su conjunto^{18,19,30,31}. La velocidad de propagación es similar en árboles y trozas cuando la madera es homogénea y los árboles están sometidos a una buena silvicultura.

2.3 Velocidad de propagación, tipos de ondas y MoE (factores)

La velocidad de propagación de una onda acústica en la madera está relacionada con numerosos factores como las propiedades mecánicas, el contenido de humedad, la temperatura y la orientación de las fibras²². La madera es un material ortotrópico, es decir, tiene propiedades diferentes para cada uno de los ejes o direcciones ortogonales, siendo para cada una de estas lineal y homogéneo. Esta aplicación concreta se centra en la dirección longitudinal.

El estudio de la propagación de ondas en un medio se utiliza para caracterizarlo, conocer sus propiedades mecánicas³²⁻³⁴. Aunque la propagación de ondas en un medio suele ser conocida, sobre todo para materiales homogéneos, en el caso de los árboles, la propagación es compleja debido a la anisotropía del medio y la irregularidad de la geometría.

El método acústico aplicado en este TFM y que se explicará con más detalladamente en el Apartado 3.2.1, consiste en realizar un impacto con un martillo, entonces se genera una onda que se propaga como onda de volumen³⁵⁻³⁷, que tras una distancia de aproximadamente 10 diámetros pasa a comportarse como ondas unidireccionales u ondas guiadas con un frente de ondas plano³⁸. En el caso de los árboles en estudio, se considera que las ondas se propagan como ondas de volumen, puesto que se ha elegido una distancia entre sensores adecuada para evitar la

conversión de ondas. El desplazamiento de la onda de volumen se expresa en función de los potenciales, a partir de la ecuación de Helmholtz³⁹, como la composición de una onda de compresión longitudinal y una onda de corte transversal como se muestra en la Figura 1.

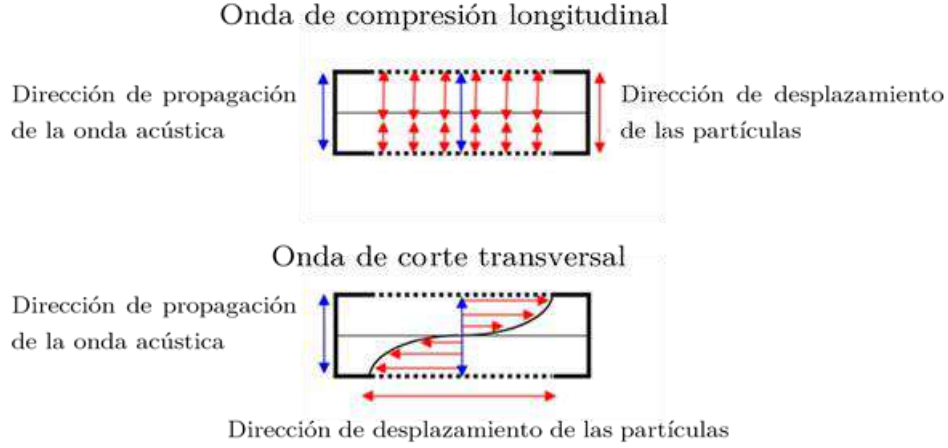


Figura 1. Tipos de ondas que componen una onda de volumen

La velocidad de propagación de la onda de compresión en un medio está relacionada con las propiedades de ese medio en esa dirección. Sabiendo que la madera es un material ortótropo, utilizando la ecuación de Kelvin-Chistoffel se puede calcular la velocidad de propagación de una onda de compresión y de una onda de corte en las direcciones de propagación relativas a los ejes ortotrópicos⁴⁰⁻⁴⁸.

Kelvin-Chistoffel propone un cálculo de la velocidad teórica de una onda acústica de volumen en sentido longitudinal

$$v = \sqrt{\frac{MoE}{\rho}} \cdot k \quad (1)$$

siendo MoE el módulo de elasticidad longitudinal, ρ la densidad y k un parámetro dependiente del coeficiente de Poisson.

El parámetro k está relacionado con el coeficiente de Poisson (ν), y siempre es mayor que 1. En un medio ortótropo como la madera, el coeficiente de Poisson es distinto en cada dirección y k se calcula como^{40,46}

$$k = \sqrt{\frac{1 - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR}}{1 - \nu_{RT} \cdot \nu_{TR} - \alpha'}} \quad (2)$$

$$\alpha' = 2 \cdot \nu_{RL} \cdot \nu_{TR} \cdot \nu_{LT} + \nu_{TL} \cdot \nu_{LT} + \nu_{RL} \cdot \nu_{LR}$$

haciendo referencia RL a radial-longitudinal, TR a tangencial-radial y TL a tangencial-longitudinal.

Si el medio es isótropo el coeficiente de Poisson es igual en todas las direcciones, solo existe un valor, por tanto, el cálculo se simplifica

$$k = \sqrt{\frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad (3)$$

En los estudios de la velocidad de propagación en árboles en pie, no se conoce el coeficiente de Poisson del árbol, es un parámetro que se debe obtener mediante probetas y ensayos destructivos. Se suelen usar los valores de k característicos de cada especie, pero como existe gran variabilidad y la influencia del parámetro k es muy limitada, generalmente los estudios de propagación realizan una aproximación de la ecuación de la velocidad de propagación para un medio isótropo, homogéneo y en forma de varilla delgada.^{36,49-51}

$$v = \sqrt{\frac{\text{MoE}}{\rho}} \quad (4)$$

Los troncos de los árboles son ortótropos, no homogéneos y en forma cónica, por tanto, el uso de la ecuación 4 conllevará errores. Aunque de forma experimental se ha demostrado que la velocidad obtenida, y con ella el MoE, se ajustan al resultado de otros tipos de ensayos como los de flexión. El valor de MoE se puede obtener despejando de la fórmula de la velocidad de propagación, conociendo la velocidad (v) y la densidad (ρ) de cada árbol:

$$\text{MoE} = v^2 \rho \quad (5)$$

3. Materiales y métodos

3.1 Descripción de las plantaciones

El estudio se ha llevado a cabo en dos tipos de plantaciones: choperas y plantaciones de nogal, situadas principalmente en la provincia de Granada, como puede verse en la Figura 2.



Figura 2. Ubicación de las plantaciones. Color azul: Choperas; Color amarillo: Plantaciones de nogal a: Situación de las plantaciones en España. b: Situación de las plantaciones en la Vega de Granada

Se han estudiado 13 plantaciones en total: 7 choperas y 6 plantaciones de nogal. La mayoría de plantaciones están activas actualmente, siguen en crecimiento, solo se han cortado las choperas de I-214 de Yunquera de Henares (C-I) y de Granada (C-II).

Cada plantación tiene asignado un nombre y un código para facilitar su reconocimiento. El nombre utilizado es el tipo de plantación (chopero o plantación de nogales), seguida del clon del árbol y su ubicación (localidad). El código está indicado al lado de cada plantación (la letra C o N, según sean de chopos y nogales y un número romano).

	Árbol	Clon	Ubicación	Marco [m x m]	Fecha de plantación
C-I	Chopo	I-214	Yunquera de Henares (GU)	5 x 5	2006*
C-II	Chopo	I-214	Granada (GR)	5 x 5	2010*
C-III	Chopo	Luisa Avanzo	Fuente Vaqueros (GR)	4 x 5	2012
C-IV	Chopo	MC	Pedro Ruíz (GR)	4 x 5	2012
C-V	Chopo	MC	El Jau (GR)	4 x 4	2014
C-VI	Chopo	I-214; Unal; Raspalje; Beaupré	Santa Fe (GR)	5 x 5	2015
C-VII	Chopo	I-214	Guadix (GR)	4 x 4,5	2016
N-I	Nogal	Ng23xRa	Moraleda de Zafayona (GR)	5 x 5	2006
N-II	Nogal	Mj209xRa	IFAPA (GR)	6 x 6	2009
N-III	Nogal	Mj209xRa	Granada (GR)	5 x 5	2010
N-IV	Nogal	D117; D15; D48; D51; D53; DA; DE; DN	Arzúa (LC)	3 x 6	2013
N-V	Nogal	D117; D15; D48; D51; D53; DA; DE; DN;	Carpio (TO)	3 x 6	2014
N-VI	Nogal	D117; D15; D48; D51; D53; DA; DE; DN	IFAPA (GR)	3 x 6	2014

Tabla 1. Resumen de los datos más significativos de las plantaciones. GR: Provincia de Granada; GU: Provincia de Guadalajara; TO: Provincia de Toledo; LC: Provincia de La Coruña. *: Chopera ya cortada

De cada plantación se determinó al menos una medida de velocidad de vuelo, pudiendo llegar hasta 4, con una separación mínima entre ellas de 3 meses, una medida por estación. Las medidas de densidad, necesarias para obtener el módulo elástico, se realizan cada 6 meses, medida de invierno y de verano. La Tabla 2 muestra un resumen con las medidas realizadas en cada plantación.

	Árbol	Medidas realizadas						
		2018		2019			2020	
		Marzo	Sept/Oct	Enero /Feb	Sept	Nov / Dic	Marzo	Junio
C-I	Chopo		v					
C-II	Chopo	v	v+d	v+d				
C-III	Chopo				v	v+d		v
C-IV	Chopo							v+d
C-V	Chopo							v+d
C-VI	Chopo				v	v+d	v	v+d
C-VII	Chopo				v	v+d		
N-I	Nogal				v	v+d		
N-II	Nogal				v	v+d	v	v+d
N-III	Nogal				v	v+d	v	v+d
N-IV	Nogal					v+d		
N-V	Nogal					v+d		
N-VI	Nogal				v	v+d	v	

Tabla 2. Resumen de las medidas realizadas en cada plantación. v: Medida de velocidad. d: Medida de densidad

A continuación, se describen de manera más detallada los datos de cada plantación como son el genotipo, la ubicación, el año de plantación, el marco de plantaciones, así como cualquier característica específica que se considere relevante.

C-I. Chopera de I-214 en Yunquera de Henares (Guadalajara)

Plantada en marzo del 2006 con un marco de plantación de 5,5 m x 5,5 m a raíz profunda. La chopera se cortó en octubre de 2018. El turno de corta de esta chopera, al encontrarse en Guadalajara, es superior a los de Granada. Se midió la velocidad justo antes de su corta. El clon plantado era el I-214, que proviene del *Populus x euramericana* (cruce entre *Populus Nigra* y *Populus Deltoides*). Actualmente es el clon más utilizado en España, sus propiedades están ampliamente estudiadas. El ensayo de velocidad y MoE se realizó en 15 árboles escogidos aleatoriamente excluyendo los del borde.

C-II. Chopera de I-214 en Granada

Se trata de una chopera mixta con nogales, con tres zonas, una mixta de chopos y nogales, otra pura de chopos y otra pura de nogales con un diseño en bloques completos al azar. Los chopos plantados son del clon I-214. Plantada a raíz superficial en 2010 con un marco de plantación de 5 m x 5 m, que se traduce en una densidad de 200 chopos y 200 nogales por hectárea en la zona mixta y 400 chopos por hectárea en la zona pura. La distribución de los árboles corresponde a un diseño experimental, que permite la utilización de un test estadístico paramétrico. La Figura 3 muestra el plano de las plantaciones y la posición de cada árbol. Los nogales se describen en N-III. Esta chopera se taló en febrero de 2019. El estudio de velocidad de propagación se realizó en 18 chopos de la zona mixta y 36 de la zona pura. El estudio de densidad se realizó en 12 árboles.

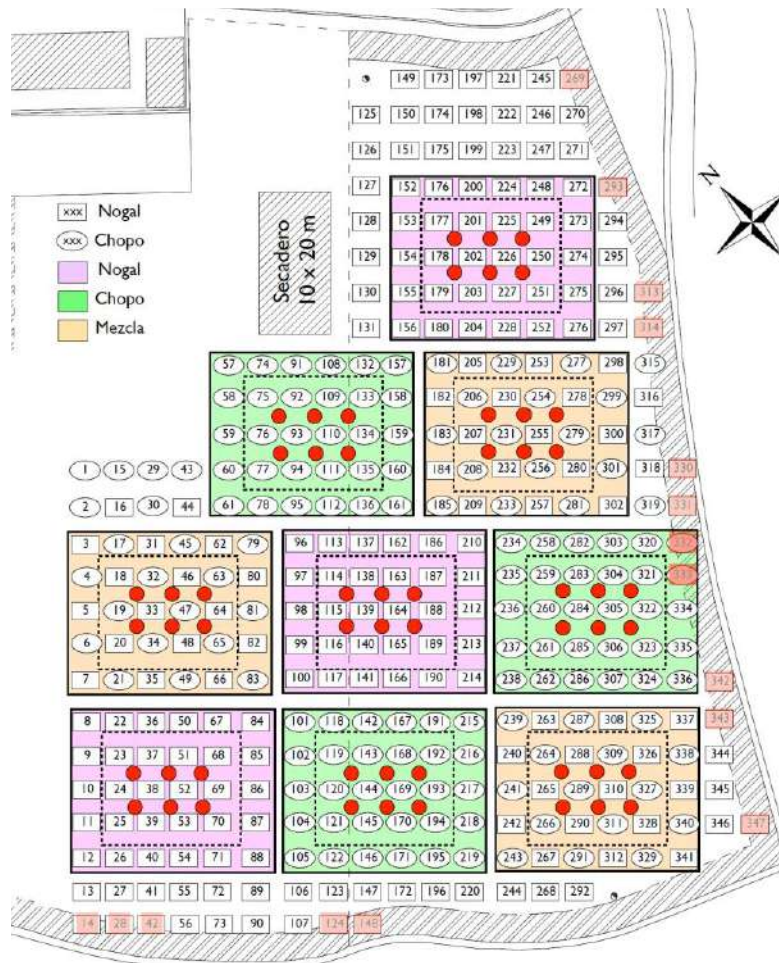


Figura 3. Plano de las plantaciones C-II y N-III

C-III. Chopera de Luisa Avanzo en Fuente Vaqueros (Granada)

Plantada en 2012 con un marco de plantación de 4 m x 5 m a raíz superficial, actualmente se encuentra activa. El clon plantado es Luisa Avanzo de la especie *Populus x euramericana*. Este clon ha sido muy utilizado por su rápido crecimiento en los primeros años, pero que actualmente su uso está decayendo. Se midieron 15 árboles seleccionados aleatoriamente evitando los bordes. La plantación tenía 8 verdes en las medidas de 2019 y 9 en la de 2020. Esta chopera está próxima a su tala, en la Vega de Granada el turno de corta torna los 10 años.

C-IV. Chopera de MC en Pedro Ruiz (Granada)

Plantada en 2012 con un marco de plantación de 4 m x 5 m a raíz superficial. Los chopos son del clon MC de la especie *Populus x euramericana*. Este clon, también conocido en Granada como NNDV, tiene un crecimiento rápido y actualmente su uso se está extendiendo. Las medidas se realizaron en 15 árboles elegidos aleatoriamente de la zona central. La chopera se midió con 9 verdes, al igual que pasa con la chopera C-III, está próxima a su tala.

C-V. Chopera de MC en El Jau (Granada)

Plantada en 2014 con un marco de plantación de 4 m x 4 m a raíz superficial. El clon plantado fue el MC y se midieron 15 árboles seleccionados aleatoriamente evitando los árboles de borde.

C-VI. Chopera Clonal en Santa Fe (Granada)

Se trata de una chopera con 4 genotipos, Unal, Beaupré, I-214 y Raspalje. Se trata de una chopera con diseño experimental completamente aleatorizado como se muestra en la Figura 4. El clon I-214 se utiliza como testigo. Los clones Unal, Beaupré y Raspalje de la especie *Populus x interamericana* (híbrido del *Populus Deltoides* y *Populus Trichocarpa*) son similares entre sí, y actualmente, su uso en Granada es limitado. Plantada en 2015 con un marco de plantación de 5 m x 5 m a raíz superficial. Se midió la velocidad de 41 clones de Unal, 42 de Beaupré, 48 de I-214 y 39 de Raspalje. La densidad se midió en los mismos árboles en diciembre de 2019 y en junio de 2020 en 12 clones de Unal, en 13 de Beaupré, 15 de I-214 y 10 de Raspalje. La plantación tenía 5 verdes cuando se midió en septiembre de 2019, diciembre de 2019 y marzo de 2020. En junio había empezado un nuevo periodo vegetativo, y se considera como 6 verdes.

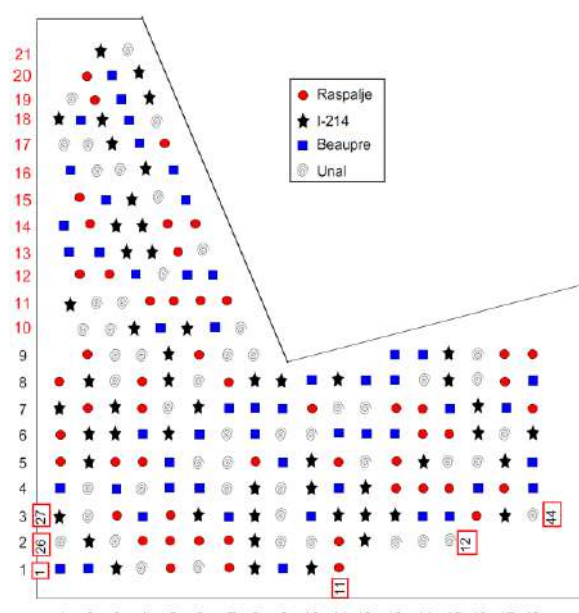


Figura 4. Plano de la plantación C-VI

C-VII. Chopera de I-214 en Guadix (Granada)

Plantada en 2016 con un marco de plantación de 4 m x 4,5 m a raíz superficial. El clon plantado es I-214 y los ensayos se hicieron en 30 árboles seleccionados aleatoriamente evitando los chopos de borde.

N-I. Plantación de nogales híbridos Ng23xRa en Moraleda de Zafayona (Granada)

Plantada en 2006 con un marco de plantación de 5 m x 5 m. Los nogales híbridos Ng23xRa son *Juglans intermedia*, provenientes del cruce entre *Juglans nigra* y

Juglans regia. Este tipo de híbridos destaca por alcanzar mayores dimensiones que sus padres y ser más resistentes a las condiciones ambientales. El ensayo se realizó en 30 árboles elegidos aleatoriamente, evitando siempre los árboles de borde. Los árboles se midieron con 11 verdes, excepto en la medida de marzo de 2020 que ya se consideran de 12 verdes. Entre los árboles híbridos existe mayor variabilidad que si fueran árboles clonales, ya que los árboles pueden parecerse a cualquiera de los progenitores o a ninguno de ellos.

N-II. Plantación de nogales híbridos Mj209xRa en el IFAPA (Granada)

Plantada en 2009 con un marco de plantación 6 m x 6 m. Los árboles plantados fueron nogales híbridos Mj209xRa, provenientes del cruce entre *Juglans major* con *Juglans regia*. Este tipo de híbridos, al igual de los Ng23xRa, son mayores que sus progenitores y más tolerantes a las condiciones ambientales. Se estudiaron 29 árboles de la plantación, agrupados en dos bloques de tres filas con cinco árboles por fila.

N-III. Plantación de nogales híbridos Mj209xRa en Granada (Granada)

Se trata de la misma plantación descrita en C-II Chopera de I-214 en Granada. Se plantó en 2010 con un marco de 5 m x 5 m, con tres zonas (Figura 3). Los chopos se talaron en 2019, por lo que actualmente, se trata de una plantación de nogales con dos tipos de densidad, 200 nogales por hectárea en las zonas mixtas y 400 nogales por hectárea en las zonas de nogales puros. El híbrido plantado es el mismo que en N-II, tiene exactamente el mismo origen, la única diferencia entre ellos es el año de plantación.

N-IV. Plantación Clonal de nogales en Arzúa (La Coruña)

Plantada en 2013 con un marco de plantación de 3 m x 6 m. Está compuesta por los clones D117, D15, D48, D51, D53, DA, DE y DN del nogal híbrido Mj209xRa. Los árboles están dispuestos siguiendo un diseño experimental en bloques al azar. La Figura 5 muestra el plano de la plantación, replicado en las plantaciones N-V y N-VI por su amplia variabilidad edafoclimática (suelo y clima).

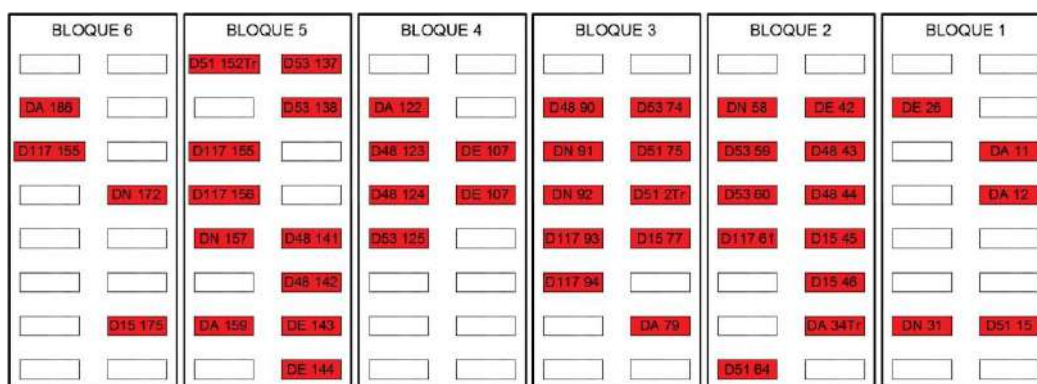


Figura 5. Plano de las plantaciones N-IV, N-V y N-VI

N-V. Plantación Clonal de nogales en Carpio (Toledo)

Está compuesta por los clones D117, D15, D48, D51, D53, DA, DE y DN. Se plantó en 2014 con un marco de plantación de 3 m x 6 m. Los clones plantados tienen el mismo origen y la misma distribución que los de la plantación N-IV (Figura 5).

N-VI. Plantación Clonal de nogales en el IFAPA (Granada)

Plantada en 2014 con un marco de 3 m x 6 m. Está compuesta por los clones D117, D15, D48, D51, D53, DA, DE y DN. Se plantaron los mismos clones, con el mismo origen y misma distribución que las plantaciones N-IV y N-V (Figura 5).

3.2 Métodos experimentales

El objetivo del presente trabajo es la determinación del módulo elástico de la madera medida en árbol en pie. Para obtener esta característica mecánica se necesita la determinación de la densidad y de la velocidad de transmisión de la onda acústica por el árbol en sentido longitudinal. A continuación, se detallan los métodos utilizados para determinar estos parámetros.

3.2.1 Medida de la velocidad de transmisión de la onda acústica

La medida de la velocidad de transmisión de la onda se realiza en sentido longitudinal en el árbol en pie. En el procedimiento se establece que se realizan 5 repeticiones en la cara norte y 5 repeticiones en la cara sur. La velocidad final se establece como la media entre todas las medidas realizadas en ambas caras.

Para obtener la velocidad de transmisión, de transmisión, se determina el tiempo que tarda la onda acústica en recorrer una distancia establecida. El ensayo realizado en campo permite determinar el tiempo de vuelo de la onda, denominado *Time of Flight (ToF)*.

La instrumentación necesaria para realizar la medición consiste en dos transductores *Fakoop SD-02* (emisor y receptor) con una resonancia de 20 kHz, cables coaxiales de conexión entre los sensores y el osciloscopio, un osciloscopio *PicoScope* con un ancho de banda máxima de 20 MHz y una frecuencia de muestreo máxima de 80 MS/s, un ordenador portátil para registrar los datos de medida y un martillo de impacto de 100 g para generar el impacto. Para la preparación del ensayo son necesarios materiales e instrumentos auxiliares como un martillo de goma (para clavar los sensores) y un flexómetro (para posicionar los sensores). En la Figura 6 se muestra el equipo necesario para la medida.

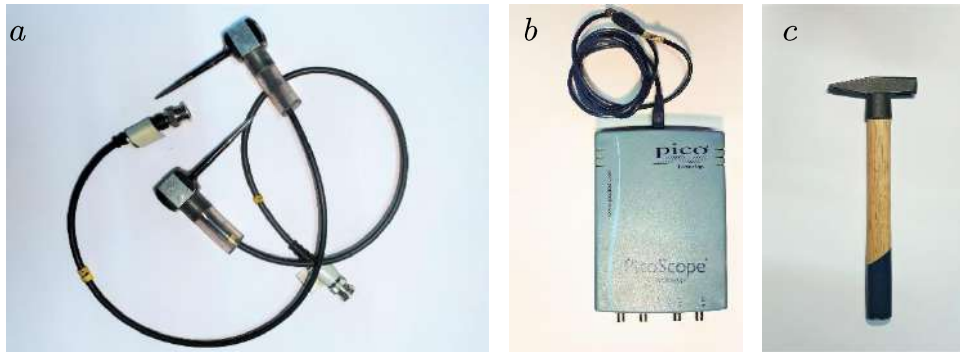


Figura 6. a: Transductores Fakoop SD-02, b: Osciloscopio PicoScope, c: Martillo de impacto

Los sensores *Fakoop* se colocan en la superficie del árbol a una distancia de 60 cm entre ellos y equidistantes a la línea de la altura de pecho (130 cm) ^{20,52,53}. Es importante que la distancia entre los sensores sea precisa, debido a que es un dato imprescindible para la determinación de la velocidad de la onda. Se deben colocar siguiendo una línea vertical, ubicando el sensor emisor en la parte superior y el sensor receptor en la parte inferior. Ambos transductores captan las ondas elásticas de compresión generadas por el impacto de un martillo en el transductor superior. Los sensores se colocan en su posición golpeando con un martillo de goma, y se introducen 25 mm con un ángulo de 45°. La Figura 7 muestra el esquema experimental y una imagen de un ensayo de campo.

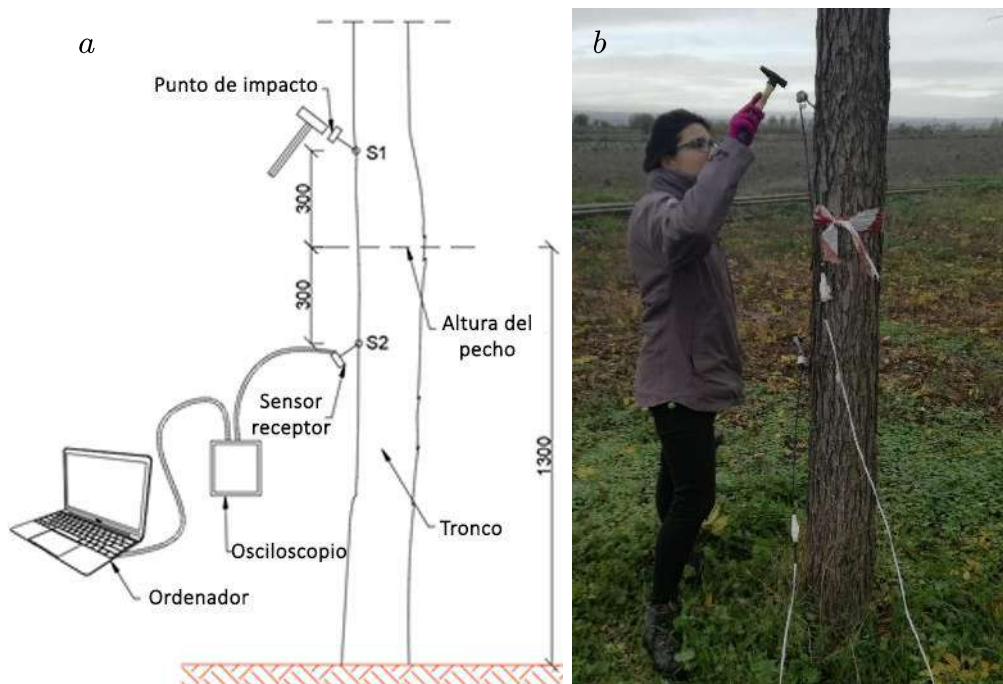


Figura 7. Esquema experimental del ensayo de medición de ToF

Antes de comenzar las mediciones, hay que realizar unas comprobaciones iniciales. Tras posicionar los sensores, se registra el ruido de fondo. Se comprueba que la señal recibida por ambos transductores antes del impacto es mínima, es decir, el ruido registrado debe ser mínimo, de tal manera que no interfiera en el cálculo

del tiempo de vuelo. La Figura 8 muestra un ejemplo de señal registrada de ruido de fondo.

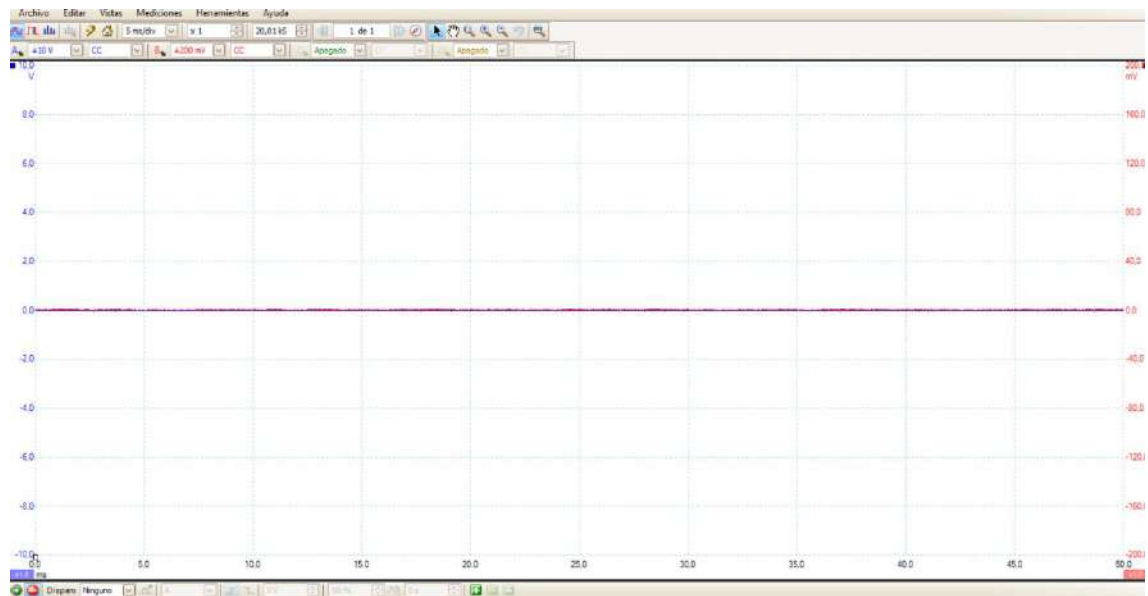


Figura 8. Señal de ruido de fondo registrada en un ensayo. Señal en color azul: Emisor; Señal en color rojo: Receptor

Durante el ensayo se realiza la grabación de la señal registrada en el sensor emisor (canal A, en azul, escala en V) producida por el golpeo con el martillo de impacto y la señal que recibe el sensor receptor tras la transmisión por el árbol de la onda (canal B, en rojo, escala en mV). La Figura 9 muestra un ejemplo de señales registradas por el osciloscopio. Una medida se considera válida cuando el primer pico de la señal del emisor tiene una amplitud de entre 5 y 10 V y la señal del receptor no supera la escala elegida. La señal además debe estar libre de ruido.

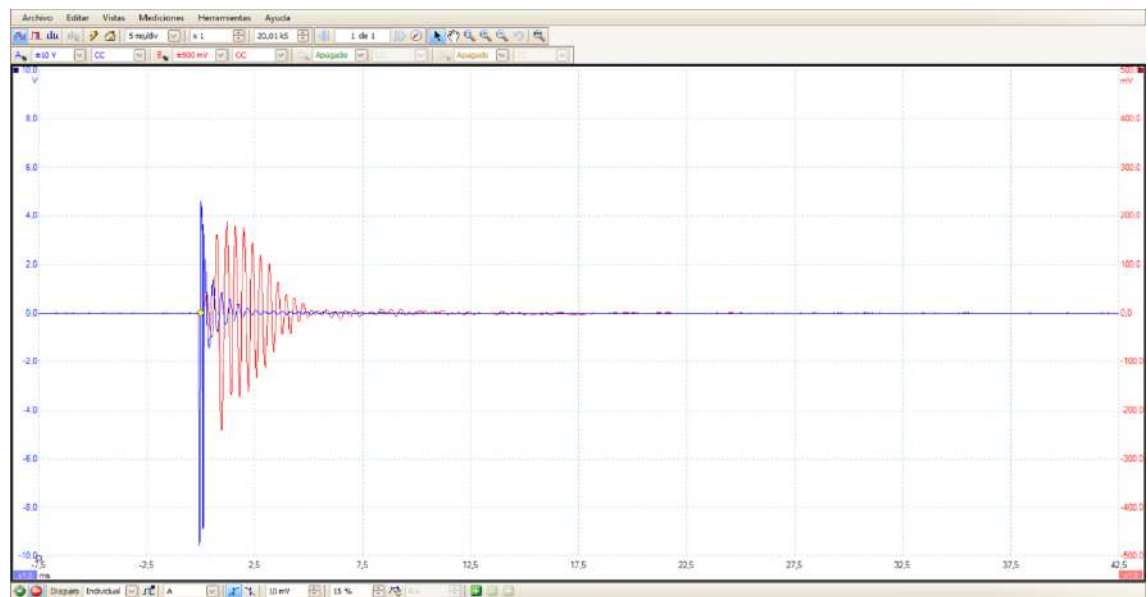


Figura 9. Señales registradas en un ensayo. Señal en color azul: Emisor; Señal en color rojo: Receptor

Las condiciones atmosféricas pueden afectar a la medición. Por tanto, se registran los datos de temperatura y humedad relativa al inicio y al final de cada medición.

Para la obtención del *ToF*, las señales registradas se procesan siguiendo el Criterio de Información de Akaike, como se explica en el apartado 3.2.2.

Si t_1 y t_2 son el tiempo de llegada de las señales recibidas en los sensores separados 60 cm, $x(t_1)$ y $x(t_2)$, la diferencia entre ambos valores $\Delta t = t_2 - t_1$, permite calcular la velocidad de propagación de la onda longitudinal en la madera exterior del árbol^{16,18,53} como:

$$v = \frac{d}{\Delta t} \quad (6)$$

3.2.2 Determinación del *ToF*: Criterio de Akaike (*AIC*)

Para determinar el tiempo de llegada de una señal tradicionalmente se ha utilizado la técnica de detección por umbral^{20,24,54}. Existen otros métodos alternativos como los basados en la reducción de ruido⁵⁵, en la estadística de orden superior⁵⁶, el umbral flotante y el Criterio de Información de Akaike²⁶.

El Criterio de Información de Akaike está basado en la entropía de la señal. Este método es robusto en presencia de ruido en la señal, y es especialmente adecuado cuando la llegada de la onda es suave⁵⁷⁻⁵⁹. Por estos motivos, ha sido el método elegido en este trabajo para la determinación del *ToF*.

La determinación del tiempo de llegada de las señales $x(t_1)$ y $x(t_2)$ es un aspecto clave para calcular la velocidad de propagación. El método tradicional y más fácil es el de detección por umbral y consiste en establecer un umbral (valor de amplitud). En consecuencia, t_1 y t_2 se consideran el primer cruce del umbral (*FCT*). Este método es muy dependiente del umbral elegido. Si el umbral es bajo, el *ToF* será más bajo del real por la presencia de ruido eléctrico. El método es correcto idealmente si *FCT* coincide con *ToF*.

El Criterio de Información de Akaike (*AIC*) es una alternativa al método de detección por umbral. Este método se desarrolló en 1971^{60,61} y es especialmente adecuado para señales transitorias⁵⁷⁻⁵⁹. EL *AIC* puede separar de forma eficiente diferentes eventos en una señal temporal o detectar el tiempo de llegada de una señal. El método se basa en el siguiente argumento: a la izquierda del tiempo de llegada la señal es básicamente ruido que se caracteriza por una alta entropía, y a la derecha del tiempo de llegada la contribución del ruido es mínima, y por tanto, la señal tiene una baja entropía. Esto implica que justo en el *ToF* hay una fuerte diferencia de entropía entre la sección de la izquierda y de la derecha de la señal.

En particular la función de Akaike, definida como diferencia de entropía de la señal entre los segmentos de la izquierda y de la derecha de la señal, se calcula como

$$AIC(k) = k \cdot \log(\text{variance}(x(1:k))) + (N - k - 1) \log(\text{variance}(x(k + 1:N))) \quad (7)$$

onde N es el número total de datos de la señal y k es el orden de cada muestra en la señal.

La Figura 10 muestra el ejemplo de una señal $x(t_2)$ recibida en un transductor y la correspondiente función AIC . Se observa que la primera parte de la señal, con baja amplitud y en la que solo se registra ruido de fondo, tiene una función de AIC decreciente. En el momento en el que comienza la señal, la función de AIC comienza a crecer. El punto en el que se alcanza el valor mínimo de AIC corresponde con el tiempo de llegada la señal y se caracteriza porque la diferencia entre la entropía es máxima y, por tanto, la función de Akaike alcanza su valor mínimo. Visualmente se puede comprobar que el ToF coincide con el mínimo absoluto de la función AIC , sin tener ninguna influencia el umbral utilizado.

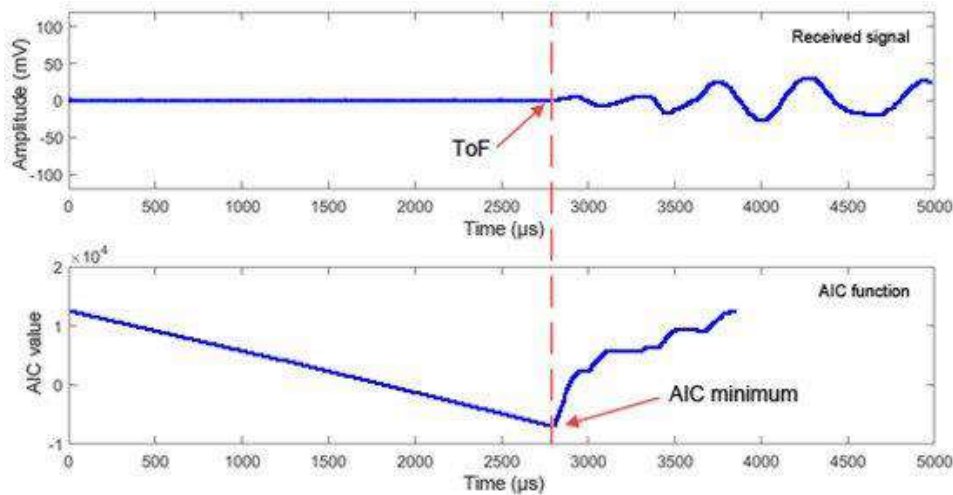


Figura 10. Ejemplo de detección de ToF usando el método de Akaike

La velocidad de propagación longitudinal obtenida con la aplicación el método de Akaike para calcular el ToF es constante, sin embargo, con la aplicación del método del umbral se producen variaciones dependiendo del umbral escogido. Debido a la estabilidad que proporciona a los resultados el cálculo del ToF aplicando la función de Akaike, ha sido el método elegido en este trabajo.

3.2.3 Medida de la densidad en verde

Para determinar el MoE, que es el objetivo de este estudio, es necesario obtener la densidad en verde en los chopos y nogales de las plantaciones, entendida como la densidad del árbol en pie, con el mismo contenido de humedad que tiene el árbol. En la primera medida de la densidad que se realizó en cada parcela, se

midieron todos los especímenes de la plantación, a partir de la segunda y sucesivas medidas solo se midió una muestra. Los árboles seleccionados como representativos para formar la muestra de la plantación son aquellos cuyo DBH (diámetro a la altura del pecho) está más próximo al valor medio obtenido en la medición anterior.

La densidad en verde se mide extrayendo una barrena a la altura del pecho (130 cm). Las muestras se obtienen con una barrena de *Trephor35* en los chopos y de *Pressler* para los nogales. La elección del tipo de barrena se debe a la diferencia de dureza de las maderas. La Figura 11 muestra ambas barrenas.

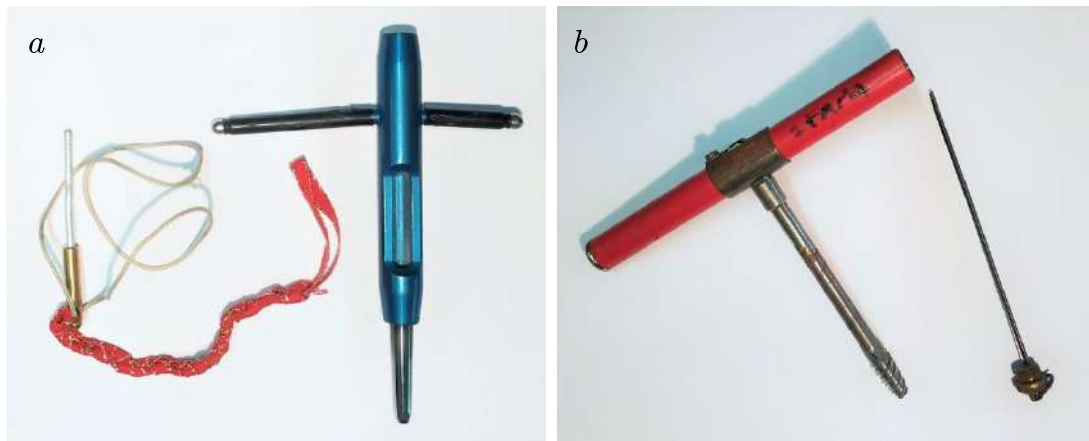


Figura 11. a: Barrena de *Trephor35*. b: Barrena de *Pressler*

El procedimiento de extracción de muestras con ambas barrenas difiere ligeramente. En ambos casos la barrena se sitúa perpendicularmente al tronco, introduciéndose la barrena de *Trephor35* mediante golpes secos con un martillo semirrígido y la barrena de *Pressler* con giros en sentido horario. La barrena de *Trephor35* se extrae con un tirón y la de *Pressler* con un giro antihorario. La Figura 12 muestra la extracción de las muestras con ambas barrenas.



Figura 12. Proceso de extracción de las muestras para la determinación de la densidad en verde. a: Utilizando la barrena de *Trephor35* en chopos. b: Utilizando la barrena de *Pressler* en nogales

Tras extraer la muestra cilíndrica de la barrena, se cortan los extremos eliminando la corteza y consiguiendo la perpendicularidad entre las caras. A continuación, se pesa en el campo con una balanza de tres dígitos, empleando el

menor tiempo posible, ya que la muestra empieza a perder humedad tras extraerla. Finalmente se miden la longitud de la muestra con un calibre, el diámetro es el mismo para todas las muestras de la misma barrena. La Figura 13 muestra dos muestras extraídas con barrena, un ejemplo de chopo y otro de nogal.



Figura 13. Ejemplo de muestras extraídas con barrena de chopo (izda.) y nogal (dcha.)

La densidad en verde se calcula mediante la fórmula

$$\rho[\text{kg}/\text{m}^3] = \frac{\text{masa} [\text{g}]}{\pi \cdot \left(\frac{\text{diametro}[\text{cm}]}{2}\right)^2 \cdot \text{longitud}[\text{cm}]} \cdot 1000 \quad (8)$$

3.2.4 Determinación del MoE

El MoE se determina utilizando la densidad en verde y la velocidad de propagación de una onda acústica en árboles en pie mediante la ecuación

$$\text{MoE} = v^2 \rho \quad (9)$$

La densidad obtiene como se describe en el Apartado 3.2.3. La velocidad de propagación como se detalla en los Apartados 3.2.1 y 3.2.2.

4. Resultados de las medidas

En este capítulo se analizan los resultados de cada una de las plantaciones en todas las mediciones realizadas. Se muestran los valores medios de DBH, densidad, velocidad y MoE, incluyendo los errores estándar. Además, se muestran en gráficas los resultados de DBH frente a velocidad y DBH frente a MoE para cada plantación, con el objetivo de ver la variación de los tres parámetros en las mediciones, o la diferencia entre los valores de los clones en la misma parcela y medición.

Se ha realizado un análisis estadístico que permite comparar el comportamiento de las plantaciones en las medidas de las distintas estaciones. Se estudia si las variaciones en la velocidad de propagación y el módulo de elasticidad son significativas entre medidas. En el caso de las plantaciones con diseño experimental (C-VI, N-IV, N-V y N-VI), se ha utilizado el test paramétrico ANOVA factorial y comparación de medias mediante el Test de *Tukey*. En el resto de plantaciones, se ha empleado el test no paramétrico *Kruskal-Wallis*.

Los test de análisis de la varianza aplicados comparan si hay diferencias significativas entre mediciones, o si por el contrario, se puede considerar como grupo homogéneo. El valor p es el indicador de si existen diferencias, si $p > 0,05$ se considera que no ha habido cambios entre medidas con un nivel de confianza del 95%. A cada parámetro de cada medida se le asigna una o varias letras (A, B, C...), cuando dos medidas tienen la misma letra, significa que no hay diferencias significativas entre medidas.

Numerosos factores influyen en la velocidad de propagación. La dirección de propagación, debido a la naturaleza ortotrópica del material, es importante. La velocidad de propagación es mayor en la dirección longitudinal y menor en la tangencial^{62,63}. La velocidad longitudinal está relacionada con propiedades mecánicas como la orientación de las microfibrillas (*MFA*)⁶³⁻⁶⁶, la dimensión de las traquideas⁶⁷ y la densidad⁶⁸⁻⁷⁴. Generalmente, la velocidad aumenta con la densidad y con la disminución de la desviación de las fibras. El frente de ondas de una señal acústica tiende a seguir las fibras⁷⁵, por tanto, cualquier desviación de la fibra, la presencia de nudos o ramas hacen que disminuya la velocidad⁷⁶.

Las condiciones atmosféricas y la estación tienen impacto en la velocidad de propagación^{63,77,86,87,78-85}. El aumento de temperatura hace que disminuya la velocidad^{79,83,85,88-92}, pero donde ocurre un cambio brusco es en torno al punto de

congelación^{93,94}. El aumento de humedad también provoca una disminución de la velocidad longitudinal⁸⁰. Con las estaciones el estado de la savia varía. En invierno, la savia está parada, la humedad es menor, y por tanto, la velocidad mayor. En verano ocurre lo opuesto, la savia está fluyendo, la humedad es mayor y la velocidad decrece^{18,27,95}.

El genotipo es uno de los factores más influyentes en la velocidad. La velocidad está relacionada con la rigidez,^{17,18,37,96,97} que es un parámetro característico de cada genotipo. La edad hace que aumente la rigidez, es decir, aumenta la velocidad longitudinal^{18,27,95,98,99}.

El DBH (diámetro a la altura del pecho) tiene una correlación negativa con la velocidad. En pinos naturales, de la misma edad y localización, un mayor DBH implicaba generalmente una menor velocidad^{17,18,100}. Algunos autores afirman que esta correlación es inconsistente debido al diferente ratio de crecimiento. Como alternativa proponen comparar la velocidad con la esbeltez (altura/DBH)^{70,101-108}, que suele tener una fuerte correlación. La mayor rigidez en árboles con mayor esbeltez se debe a un mecanismo natural antipandeo¹⁰⁹.

Dentro de cada árbol la velocidad también varía. La presencia de madera de reacción puede causar variaciones en la velocidad¹¹⁰. La rigidez aumenta de la médula a la corteza, por tanto, la velocidad de propagación en la madera exterior es superior.

C-I. Chopera de I-214 en Yunquera de Henares (Guadalajara)

Los datos se extrajeron justo antes de la tala, en octubre del 2018, cuando los árboles tenían 13 verdes. La densidad en verde utilizada en el cálculo la proporcionó Industrias Monzón para toda la plantación, siendo de 750 kg/m³. La Tabla 3 muestra un resumen de los datos obtenidos.

	Octubre 2018
DBH [cm]	38,1 ± 0,8
v [km/s]	3,34 ± 0,02
MoE [MPa]	8376 ± 105

Tabla 3. Media y error estándar del DBH, velocidad y MoE para la plantación C-I

La Figura 14 muestra los datos de velocidad de propagación de la onda frente al DBH y la Figura 15 muestra el MoE obtenido para cada árbol frente a su DBH. Se observa que, aunque el DBH varíe más de 10 cm entre unos árboles y otros, los valores de velocidad y MoE se mantienen con pocas variaciones, lo que indica que estos parámetros son independientes del diámetro, dependen más de la edad y otras características del árbol.

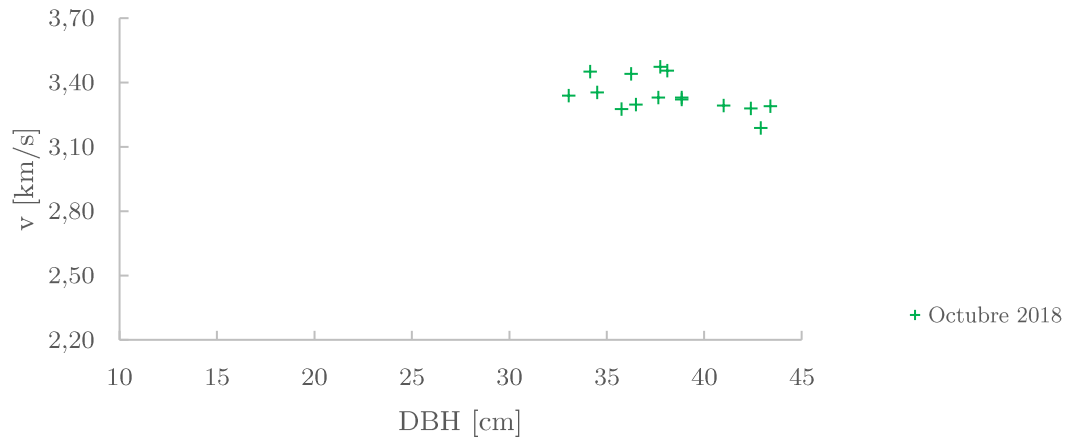


Figura 14. C-I: Resultados de la velocidad frente al DBH

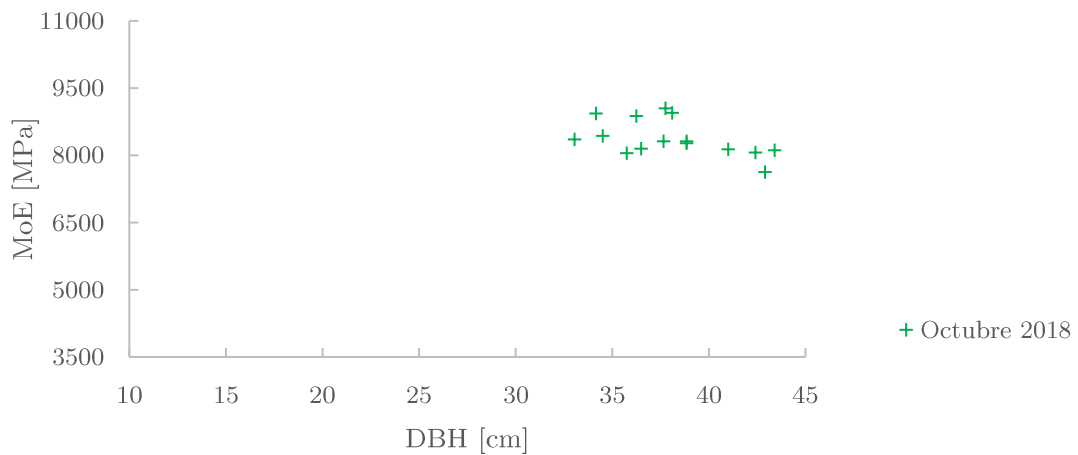


Figura 15. C-I: Resultados del MoE frente al DBH

El DBH y la velocidad no están correlacionados, no tienen relación, son dos parámetros independientes. El DBH y el MoE tampoco tienen relación, ya que el MoE se obtiene conocida la densidad y la velocidad, y ambos parámetros son independientes del diámetro.

C-II. Chopera de I-214 en Granada (Granada)

La Tabla 4 muestra la variación del DBH, densidad, velocidad y MoE con el tiempo. Según los resultados obtenidos tras aplicar el test *Kruskal-Wallis*, la velocidad en las tres mediciones presenta variaciones significativas, como revela el hecho de que le asigne tres grupos diferentes (A, B y C). Lo mismo ocurre con el MoE, que también se clasifica en dos grupos diferentes (a y b).

	Marzo 2018	Octubre 2018	Febrero 2019
DBH [cm]	28,0 ± 0,4	28,9 ± 0,4	29,3 ± 0,4
ρ [kg/m ³]	-	781 ± 14	716 ± 10
v [km/s]	3,13 ± 0,02 A	3,01 ± 0,01 B	3,05 ± 0,01 C
MoE [MPa]	-	7066 ± 43 a	6676 ± 42 b

Tabla 4. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-II. Las letras distintas (A, B, y C) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value} < 0,05$)

La Figura 16 muestra la velocidad obtenida en cada árbol frente a su DBH para cada medición. La Figura 17 muestra el MoE de cada árbol frente a su DBH. En ambos casos se observa como la velocidad y el MoE no aumentan con el tiempo. Entre la medida de octubre y la medida de febrero el árbol está parado, está en el mismo periodo vegetativo, y por tanto, el tiempo que ha transcurrido entre ambas medidas no se puede considerar relevante para el crecimiento del árbol. La velocidad puede ser mayor en los meses de invierno por el estado de la savia (el árbol está parado) y por una menor temperatura en el momento de la medición.

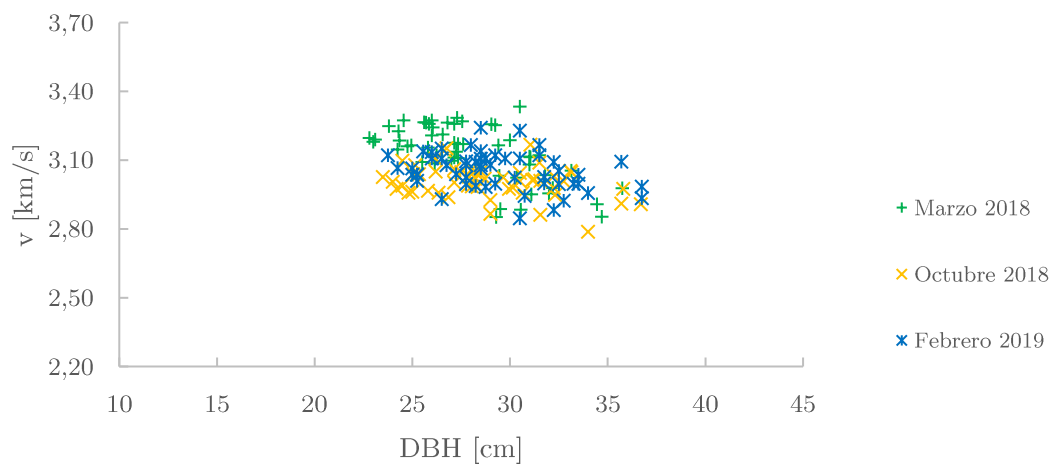


Figura 16. C-II: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

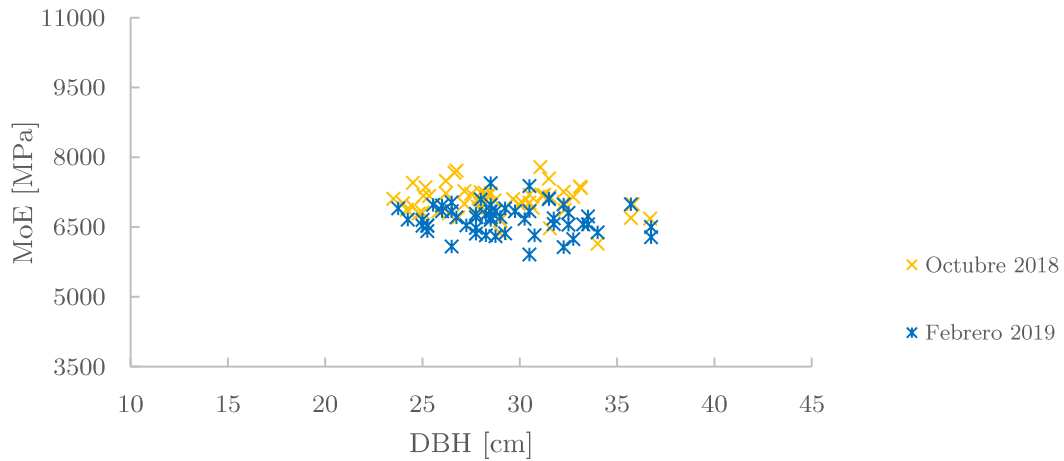


Figura 17. C-II: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición

La

Figura 18 muestra la variación en el tiempo de la velocidad y la Figura 19 la variación en el tiempo del MoE. Se observa como hay diferencias significativas entre las medidas, como determinó el Test de *Kruskal-Wallis*. La gráfica muestra para cada conjunto de medidas, el primer y tercer cuartil con la zona de color, la media con el aspa y la mediana con la línea horizontal. Las líneas verticales marcar el máximo y el mínimo de todos los valores, siendo este valor menor de 1,5 veces el rango entre el primer y tercer cuartil. En caso de existir valores fuera de ese rango, se indican mediante círculos y se denominan valores atípicos.

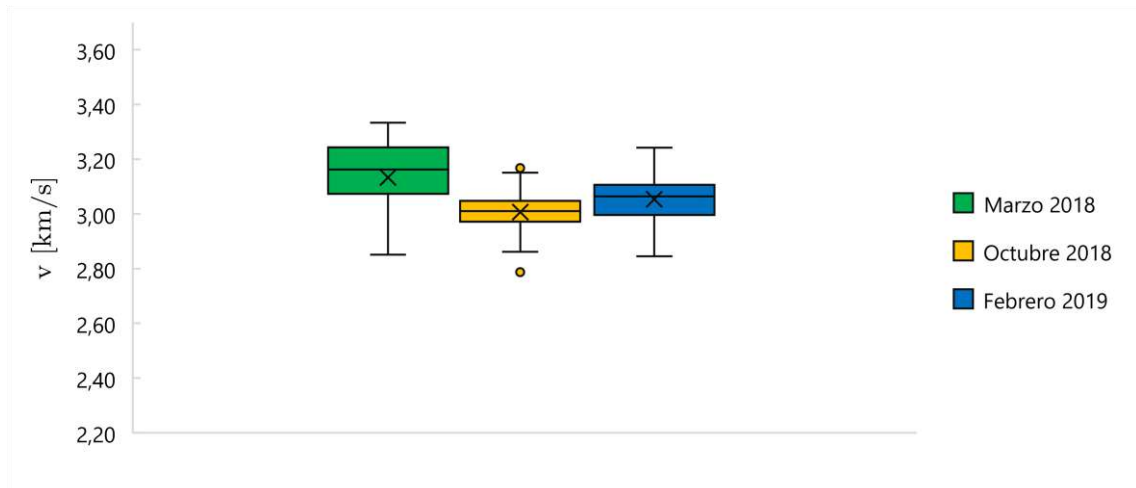


Figura 18. C-II: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas

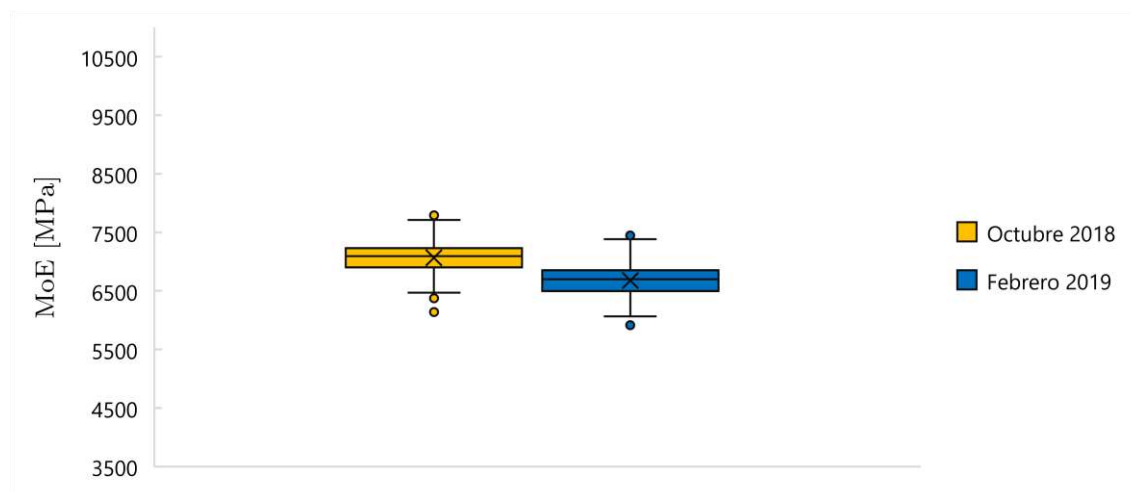


Figura 19. C-II: MoE en las mediciones realizadas

C-III. Chopera de Luisa Avanzo en Fuente Vaqueros (Granada)

La Tabla 5 muestra la variación del DBH, densidad, velocidad y MoE en el tiempo. Según el análisis estadístico realizado, las variaciones de velocidad no son significativas en el mismo periodo vegetativo, medidas de septiembre y noviembre de 2019, pero las de junio de 2020 si son diferentes a las del anterior periodo vegetativo. Igual resultado se obtuvo para el MoE, hay diferencias significativas entre las medidas de noviembre de 2019 y junio de 2020.

	Septiembre 2019	Noviembre 2019	Junio 2020
DBH [cm]	24,6 ± 0,4	24,9 ± 0,5	25,5 ± 0,5
ρ [kg/m ³]	-	724 ± 13	797 ± 17
v [km/s]	3,26 ± 0,03 A	3,32 ± 0,03 A	3,43 ± 0,02 B
MoE [MPa]	-	7986 ± 196 a	9392 ± 227 b

Tabla 5. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-III. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value} < 0,05$)

La Figura 20 muestra la velocidad frente al DBH de cada árbol para las medidas de septiembre y noviembre del 2019 y junio de 2020. Se observa como de forma generalizada la velocidad aumenta con la edad de la plantación. La Figura 21 muestra el MoE en función del DBH de cada árbol para las dos medidas realizadas. El MoE generalmente aumenta con el paso del tiempo. En este caso el comportamiento de la velocidad y el MoE es análogo, ya que la densidad ha aumentado también con el paso del tiempo.

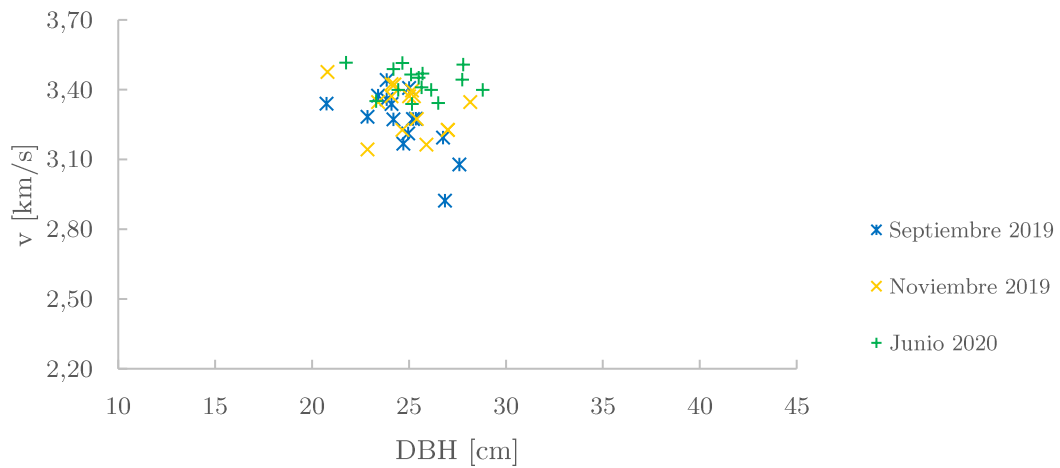


Figura 20. C-III: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

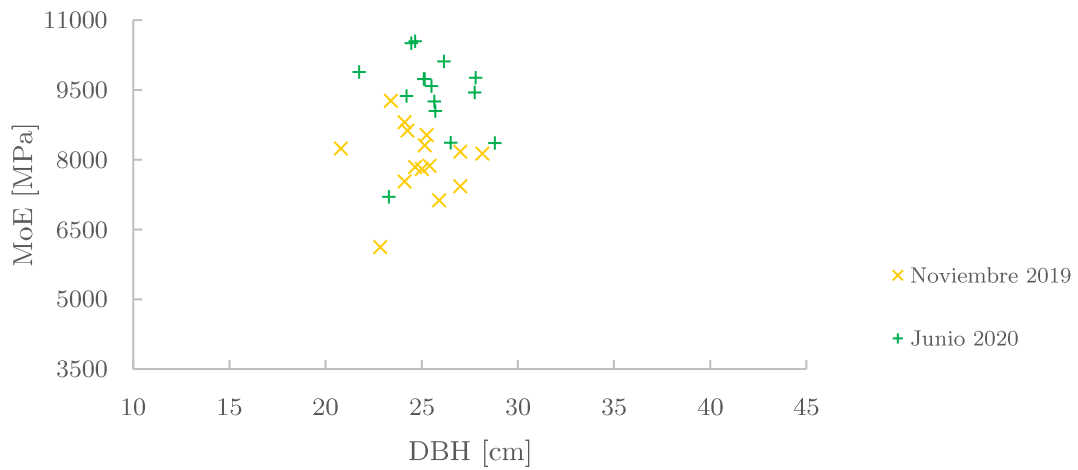


Figura 21. C-III: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición

La Figura 22 muestra la variación de la velocidad entre las medidas y la Figura 23 muestra la variación del MoE. Se aprecia como ambos parámetros aumentan con el paso del tiempo y el crecimiento del árbol.

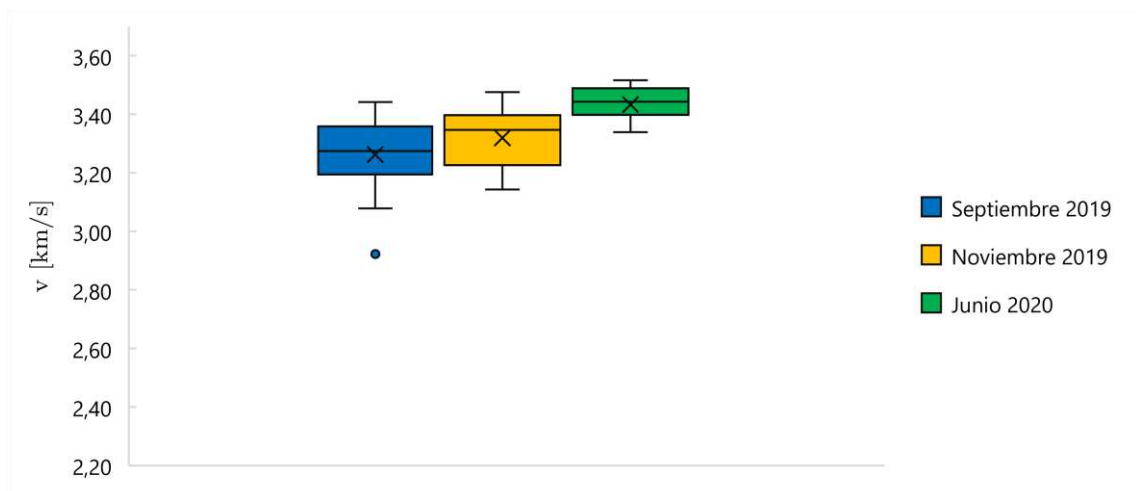


Figura 22. C-III: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas

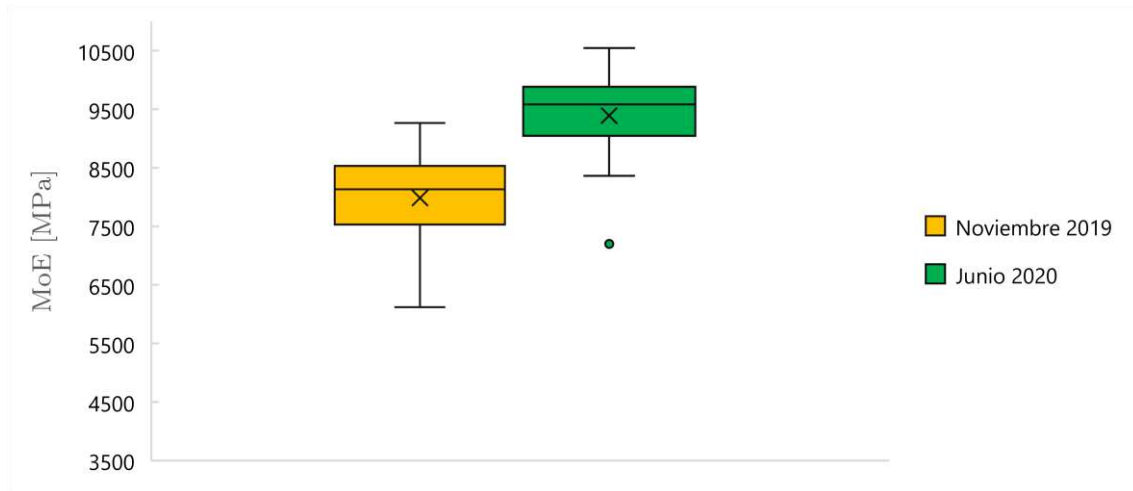


Figura 23. C-III: MoE en las mediciones realizadas

C-IV. Chopera de MC en Pedro Ruiz (Granada)

La Tabla 6 muestra los datos de DBH, densidad, velocidad y módulo elástico obtenidos en junio de 2020 en la chopera de MC de Pedro Ruiz.

	Junio 2020
DBH [cm]	26,7 ± 0,4
ρ [kg/m ³]	728 ± 10
v [km/s]	3,42 ± 0,02
MoE [MPa]	8534 ± 156

Tabla 6. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-IV

La Figura 24 muestra la velocidad de propagación en cada árbol frente a su DBH. La Figura 25 muestra el módulo elástico frente al DBH.

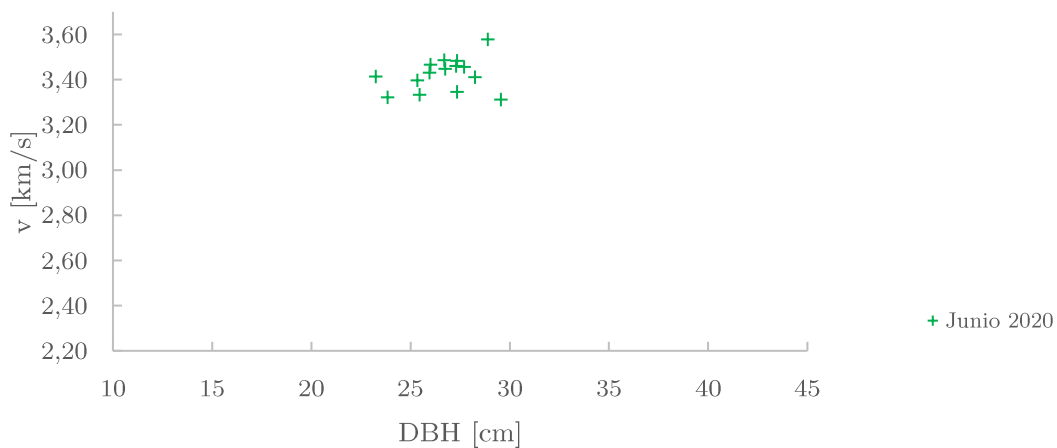


Figura 24. C-IV: Resultados de la velocidad frente al DBH

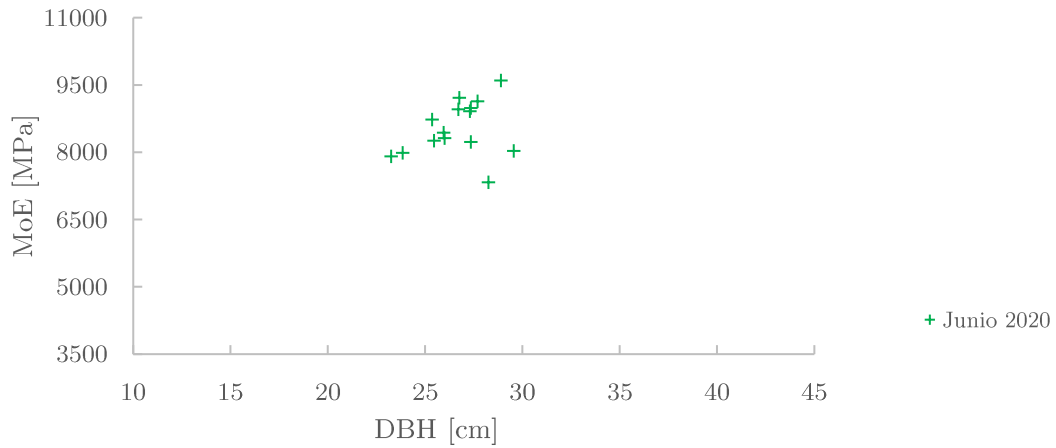


Figura 25. C-IV: Resultados del MoE frente al DBH

C-V. Chopera de MC en El Jau (Granada)

La Tabla 7 muestra los datos de DBH, densidad, velocidad y MoE obtenidos en la medición de junio de 2020.

	Junio 2020
DBH [cm]	24,3 ± 0,8
ρ [kg/m ³]	731 ± 10
v [km/s]	3,48 ± 0,02
MoE [MPa]	8862 ± 121

Tabla 7. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-V

La Figura 26 muestra los resultados de velocidad obtenidos para cada árbol frente a su DBH y la Figura 27 los de MoE frente a DBH.

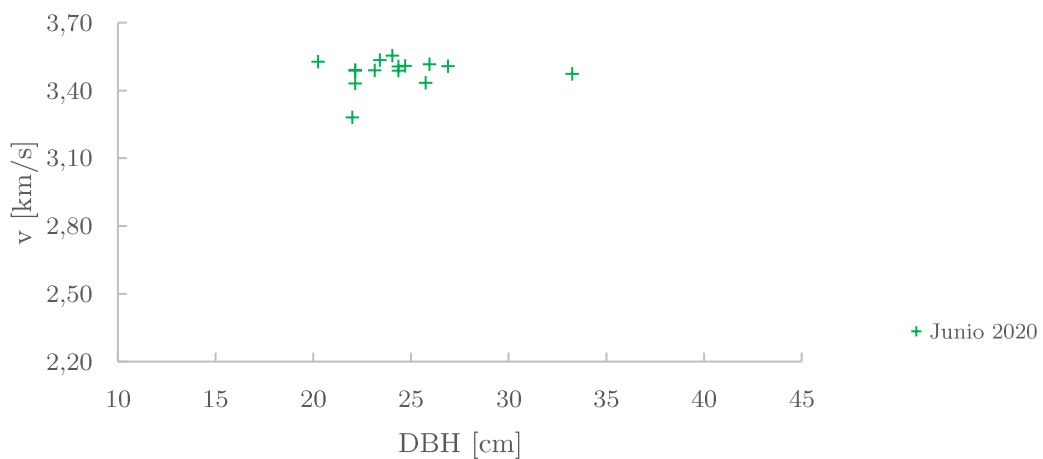


Figura 26. C-V: Resultados de la velocidad frente al DBH

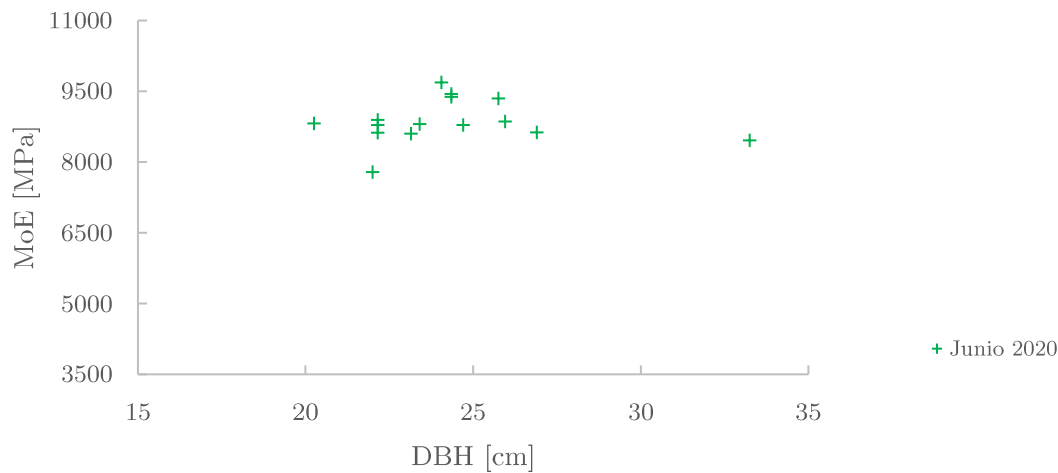


Figura 27. C-V: Resultados del MoE frente al DBH

C-VI. Chopera Clonal en Santa Fe (Granada)

Los datos relativos a la chopera clonal de Santa Fe están agrupados por clones. Uno de los objetivos de las medidas realizadas en esta chopera es comparar el comportamiento de varios clones. La Tabla 8 muestra la variación del DBH, densidad, velocidad y MoE con el tiempo para cada clon. Según el análisis estadístico realizado, las variaciones son significativas para la medida de la velocidad realizada en diciembre en todos los clones, respecto del resto de medidas. Las medidas de septiembre y marzo de velocidad en todos los clones carecen de diferencias significativas entre sí. Las medidas de MoE para cada clon no presentan diferencias significativas entre ellas.

		Septiembre 2019	Diciembre 2019	Marzo 2020	Junio 2020
Unal	DBH [cm]	16,4 ± 0,5	16,6 ± 0,5	16,6 ± 0,5	17,6 ± 0,5
	ρ [kg/m ³]	-	702 ± 9	-	774 ± 10
	v [km/s]	3,05 ± 0,02 A	3,24 ± 0,02 B	2,98 ± 0,02 A	3,15 ± 0,02 C
	MoE [MPa]	-	7366 ± 116 a	-	7487 ± 187 a
Beaupré	DBH [cm]	16,1 ± 0,3	16,5 ± 0,3	16,5 ± 0,3	17,3 ± 0,3
	ρ [kg/m ³]	-	703 ± 8	-	780 ± 16
	v [km/s]	3,07 ± 0,02 A	3,27 ± 0,01 B	3,05 ± 0,02 A	3,20 ± 0,01 B
	MoE [MPa]	-	7521 ± 91 a	-	7917 ± 169 a
I-214	DBH [cm]	20,9 ± 0,4	21,2 ± 0,4	21,2 ± 0,4	22,7 ± 0,4
	ρ [kg/m ³]	-	622 ± 8	-	674 ± 14
	v [km/s]	2,3 ± 0,01 AB	3,02 ± 0,01 C	2,78 ± 0,02 A	2,88 ± 0,01 B
	MoE [MPa]	-	5665 ± 73 a	-	5535 ± 116 a
Raspalje	DBH [cm]	17,8 ± 0,3	18,0 ± 0,3	18,0 ± 0,3	19,0 ± 0,4
	ρ [kg/m ³]	-	652 ± 10	-	717 ± 16
	v [km/s]	3,04 ± 0,02 AB	3,25 ± 0,01 C	3,00 ± 0,02 A	3,12 ± 0,01 B
	MoE [MPa]	-	6887 ± 119 a	-	7235 ± 193 a

Tabla 8. Media y error estándar agrupados por clon del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-VI. Las letras distintas (A, B, y C) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value} < 0,05$)

La Figura 28 y la Figura 29 muestran la velocidad frente al DBH en las medidas de diciembre de 2019 y junio de 2020 respectivamente. El MoE frente al DBH en diciembre de 2019 se muestra en la Figura 30 y en junio de 2020 en la Figura 31. En ambas mediciones, se aprecia que los valores de la velocidad y de MoE obtenidos para el clon I-214 son inferiores a los de los otros clones, pero el valor del DBH es superior, esto se debe a su rápido crecimiento y escasa rigidez.

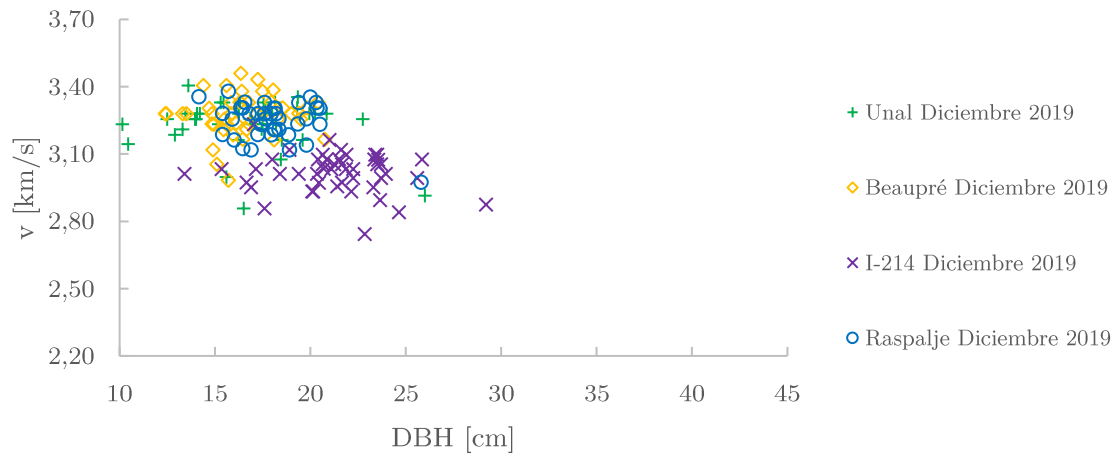


Figura 28. C-VI: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en diciembre de 2019

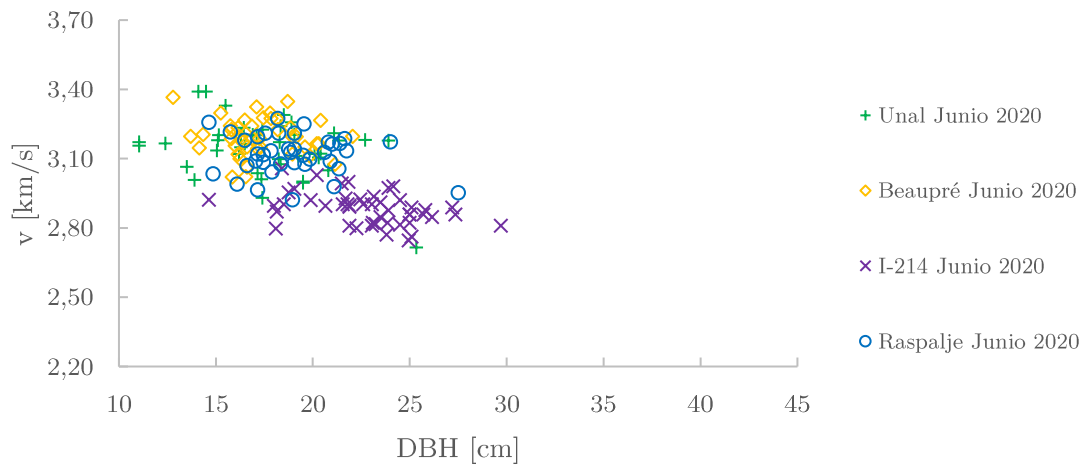


Figura 29. C-VI: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en junio de 2020

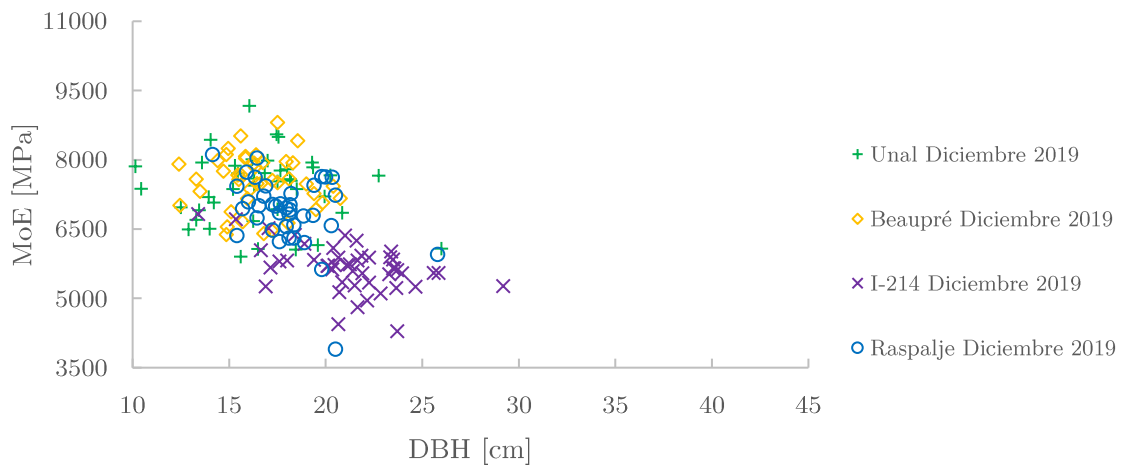


Figura 30. C-VI: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en diciembre de 2019

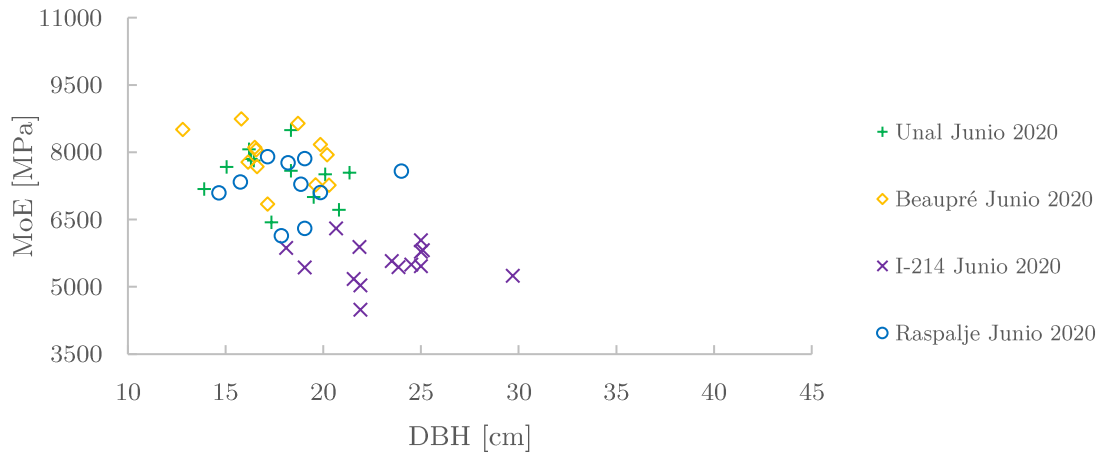


Figura 31. C-VI: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en junio de 2020

La Figura 32 muestra la variación de la velocidad en el tiempo. Se observa como la medida de diciembre de 2019 siempre tiene diferencias significativas con el resto y es superior. La Figura 33 muestra la variación del MoE en el tiempo, en todos los clones los valores obtenidos en ambas mediciones son homogéneos.

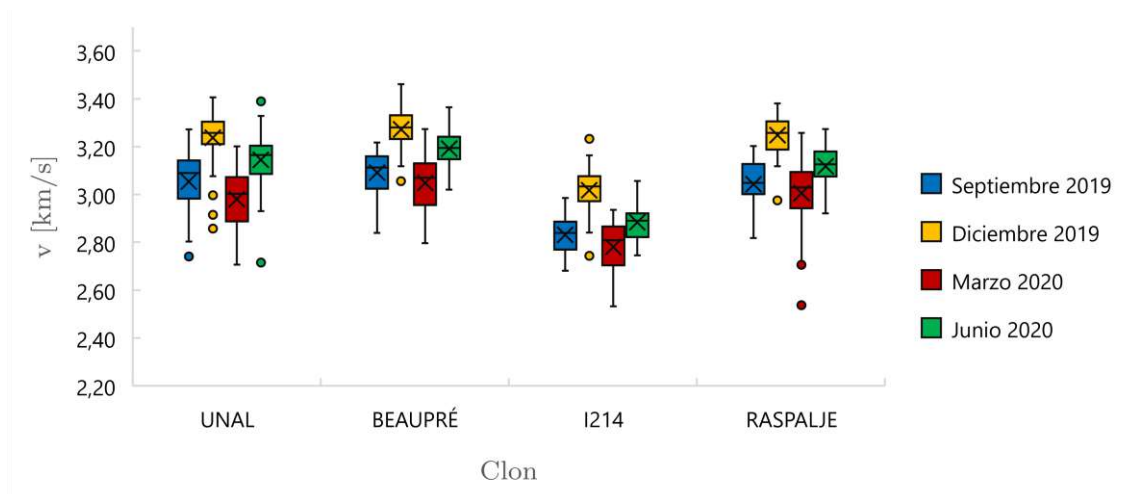


Figura 32. C-VI: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas

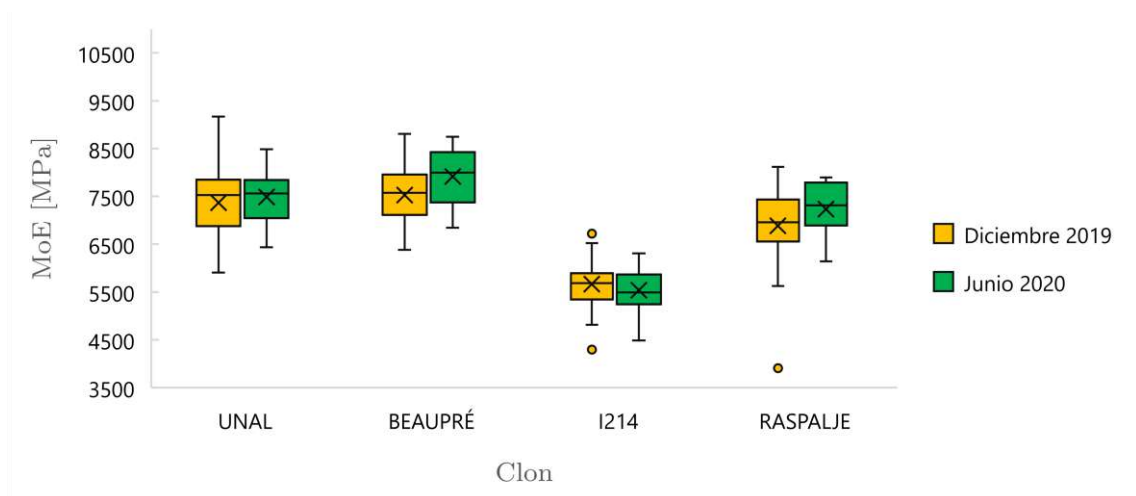


Figura 33. C-VI: MoE en las mediciones realizadas

C-VII. Chopera de I-214 en Guadix (Granada)

La Tabla 9 muestra la variación del DBH, densidad, velocidad y MoE en el tiempo. Según el análisis estadístico realizado, se aprecia que las variaciones de velocidad son significativas en las dos mediciones.

	Septiembre 2019	Diciembre 2019
DBH [cm]	18,0 ± 0,2	18,3 ± 0,2
ρ [kg/m ³]	-	593 ± 7
v [km/s]	2,93 ± 0,02 A	2,85 ± 0,02 B
MoE [MPa]	-	4831 ± 83

Tabla 9. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación C-VII. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value} < 0,05$)

La Figura 34 muestra los datos de velocidad de propagación de cada árbol frente su DBH. La Figura 35 representa el MoE frente al DBH para cada árbol. Se observa como la velocidad ha disminuido, y como el DBH, ha aumentado entre las dos medidas. El aumento del DBH es pequeño ya que ha pasado poco tiempo entre ambas medidas.

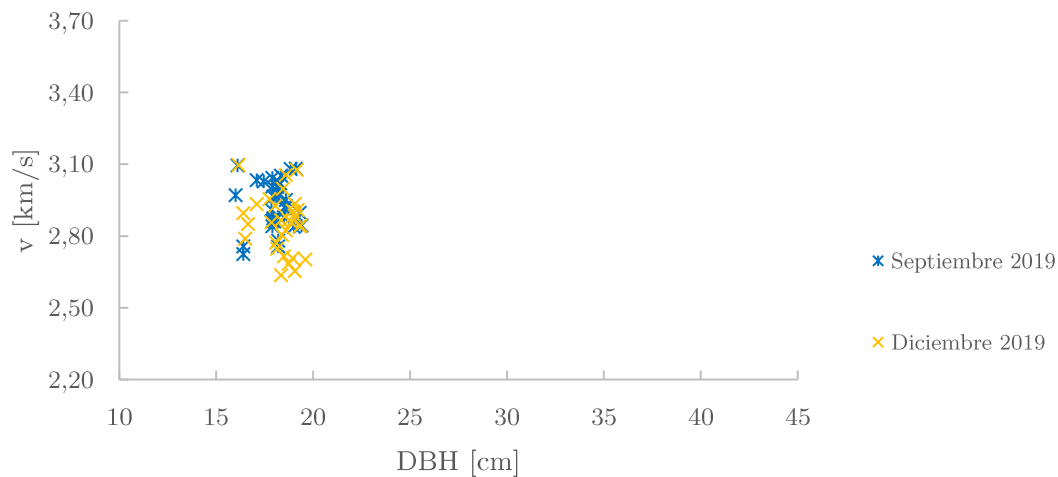


Figura 34. C-VII: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

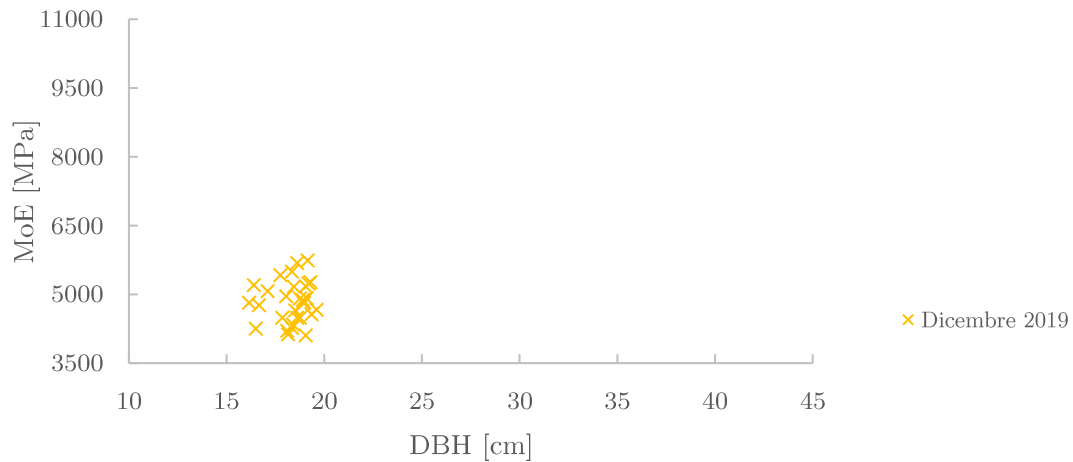


Figura 35. C-VII Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición

La Figura 36 muestra la variación de la velocidad con las medidas. En este caso, la velocidad disminuye con el tiempo, esa no es la tendencia general de la velocidad en los chopos, pero en este caso por la proximidad en el tiempo de las medidas, otros factores han tenido más influencia (como la mayor humedad de diciembre).

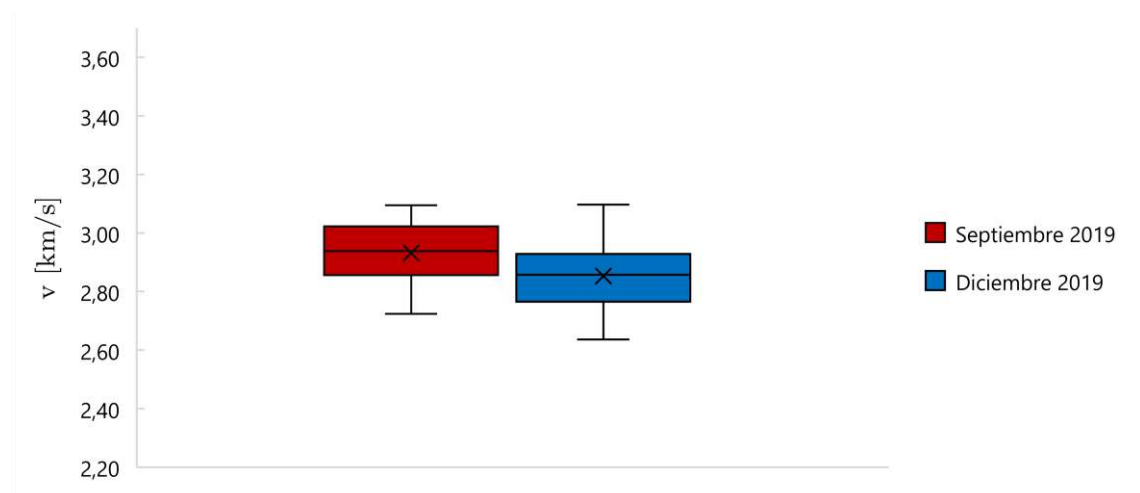


Figura 36. C-VII: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas

N-I. Plantación de nogales híbridos Ng23xRa en Moraleda de Zafayona (Granada)

La Tabla 10 muestra la variación del DBH, densidad, velocidad y MoE en el tiempo. Según el análisis estadístico realizado, las variaciones de velocidad no son significativas.

	Septiembre 2019	Diciembre 2019
DBH [cm]	19,2 ± 0,4	19,9 ± 0,4
ρ [kg/m ³]	-	975 ± 5
v [km/s]	2,73 ± 0,03 A	2,71 ± 0,03 A
MoE [MPa]	-	7194 ± 156

Tabla 10. Datos de velocidad en septiembre de 2019 para la plantación N-I. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value} < 0,05$)

La Figura 37 muestra la velocidad de propagación frente al DBH de cada árbol en las medidas de septiembre y diciembre de 2019. La Figura 38 muestra el MoE frente al DBH para la medida de diciembre de 2019. Se aprecia como el DBH ha aumentado ligeramente entre ambas medidas.

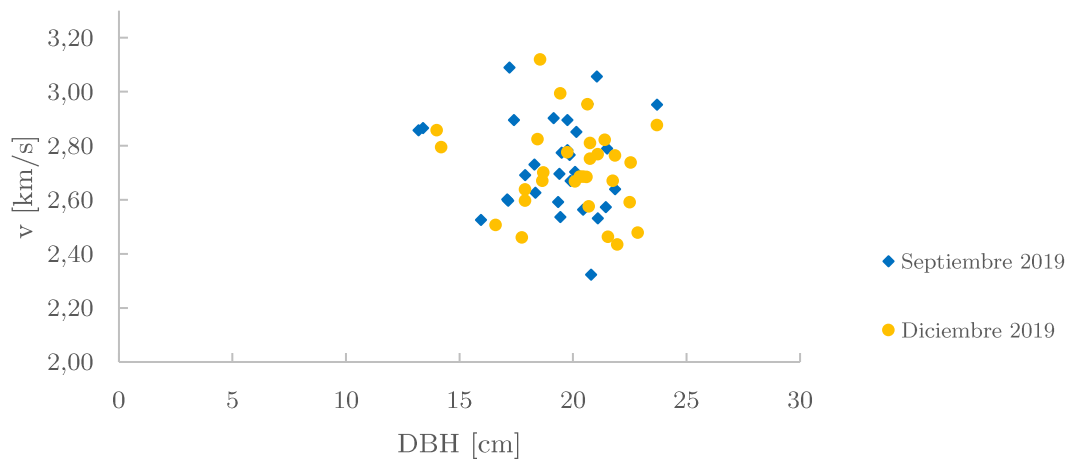


Figura 37. N-I: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

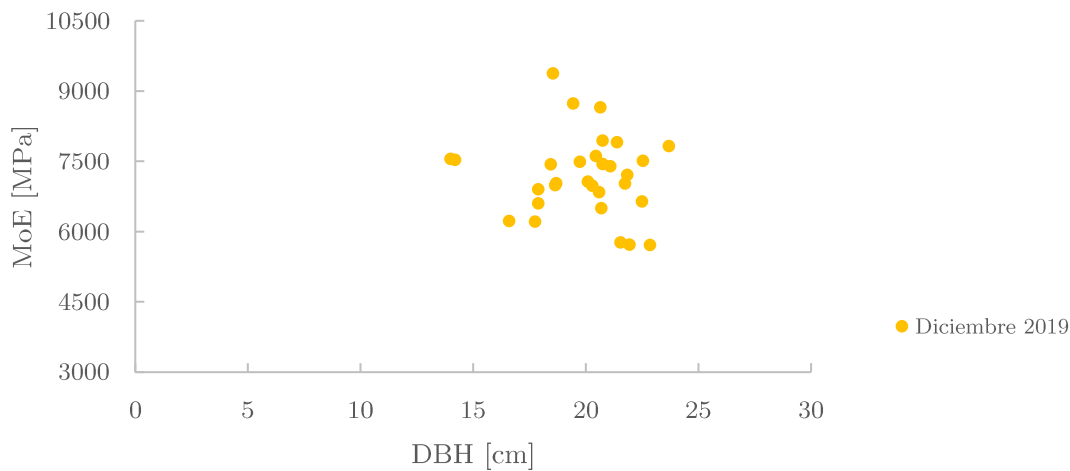


Figura 38. N-I: Resultados del MoE frente al DBH

La Figura 39 muestra la comparación entre los datos de velocidad obtenidos en septiembre y diciembre. Se observa como no existen diferencias entre ambos.

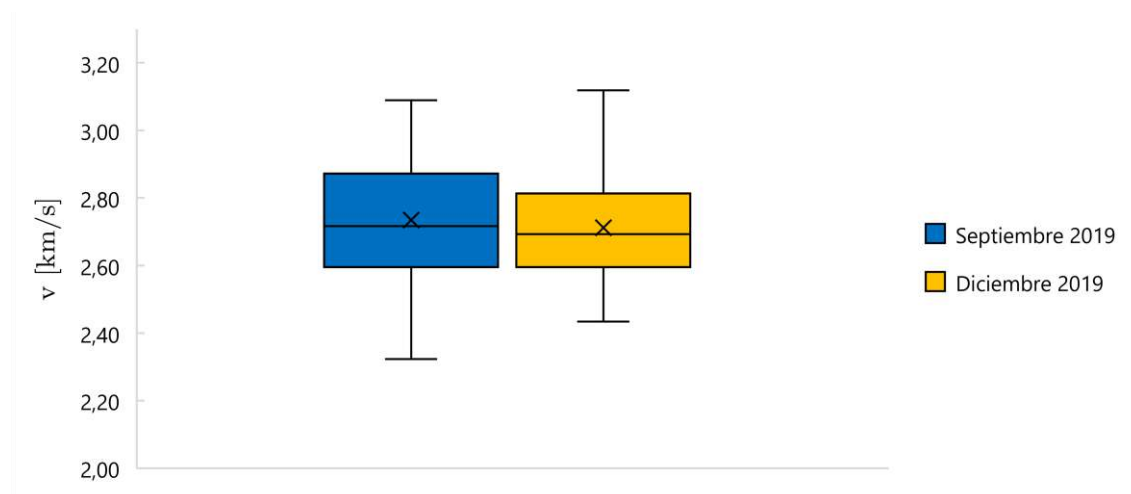


Figura 39. N-I: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas

N-II. Plantación de nogales híbridos Mj109xRa en el IFAPA (Granada)

La Tabla 11 muestra la variación del DBH, densidad, velocidad y MoE en el tiempo. Según el análisis estadístico realizado, las variaciones de velocidad son significativas en la medida de diciembre respecto a las demás, que son homogéneas. La variación entre el MoE es significativa entre las dos medidas.

	Septiembre 2019	Diciembre 2019	Marzo 2019	Junio 2020
DBH [cm]	19,5 ± 0,5	19,7 ± 0,5	19,7 ± 0,5	19,7 ± 0,5
ρ [kg/m ³]	-	869 ± 7	-	866 ± 6
v [km/s]	2,81 ± 0,03 A	2,58 ± 0,03 B	2,83 ± 0,02 A	2,82 ± 0,02 A
MoE [MPa]	-	5804 ± 136 a	-	7133 ± 144 b

Tabla 11. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-II. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p -value < 0,05)

La Figura 40 muestra la velocidad frente al DBH en cada medición y la Figura 41 el MoE frente al DBH. Se aprecia como tanto en la velocidad, como en el MoE, los valores obtenidos en la medida de diciembre son en general inferiores.

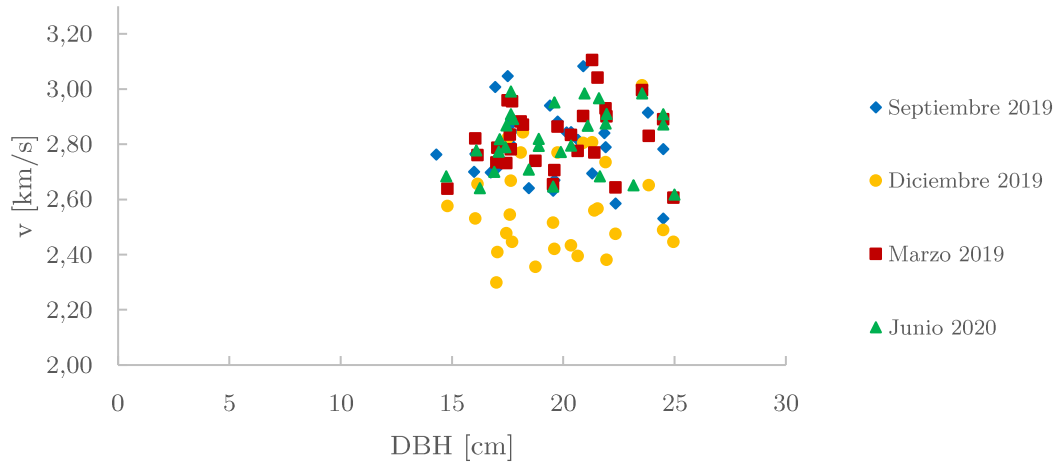


Figura 40. N-II: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

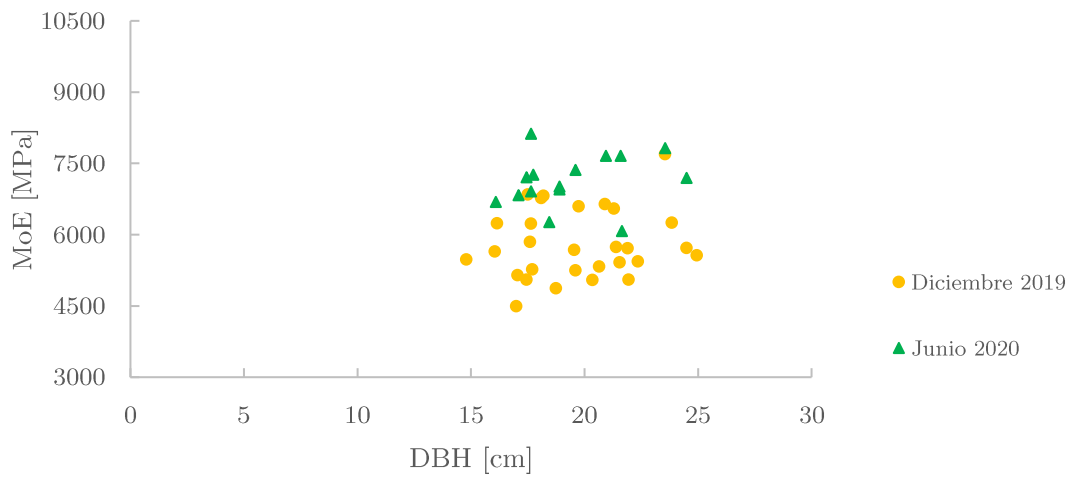


Figura 41. N-II: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición

La Figura 55 muestra la variación de la velocidad y la Figura 56 la variación en el MoE. Se observa como la velocidad solo tiene variaciones significativas en noviembre, cuando era menor. El MoE obtenido en la medición de invierno también era menor, ya que ambos parámetros están directamente relacionados.

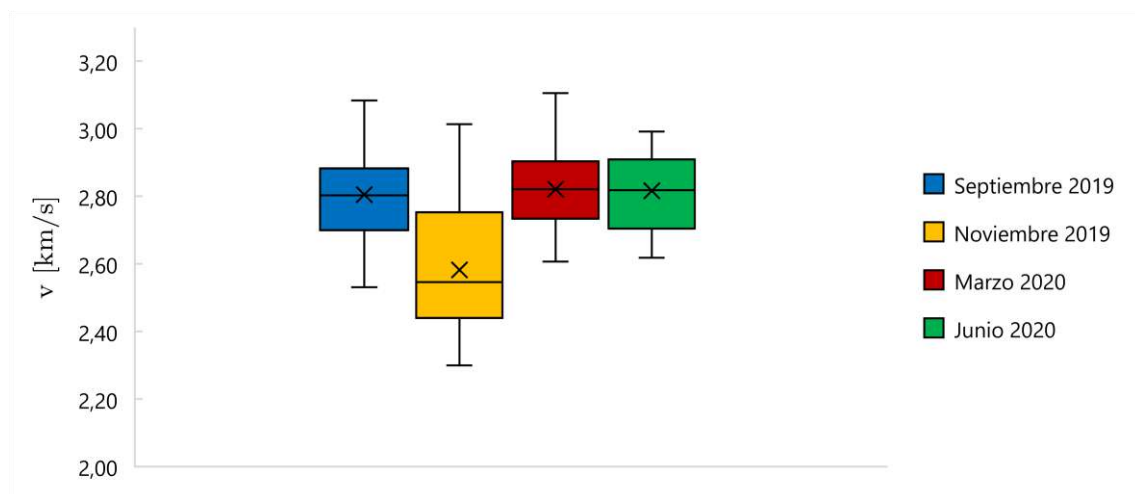


Figura 42. N-II: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas

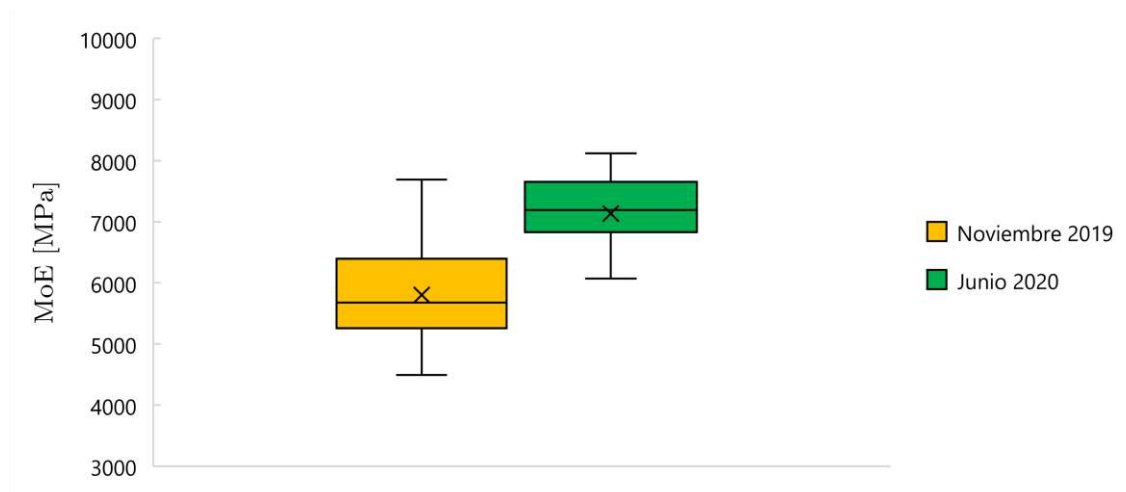


Figura 43. N-II: MoE en las mediciones realizadas

N-III. Plantación de nogales híbridos Mj209xRa en Granada (Granada)

La Tabla 12 muestra la variación del DBH, densidad, velocidad y MoE en el tiempo. Según el análisis estadístico realizado, las variaciones de velocidad son significativas entre las medidas de septiembre y junio, el resto de medidas carecen de diferencias significativas entre ellas y con estas medidas. El MoE tiene diferencias significativas entre ambas medidas.

	Septiembre 2019	Diciembre 2019	Marzo 2019	Junio 2020
DBH [cm]	12,0 ± 0,3	12,0 ± 0,3	12,0 ± 0,3	12,0 ± 0,3
ρ [kg/m ³]	-	867 ± 8	-	899 ± 18
v [km/s]	2,58 ± 0,03 A	2,63 ± 0,03 AB	2,69 ± 0,03 AB	2,74 ± 0,03 B
MoE [MPa]	-	6015 ± 143 a	-	6982 ± 203 b

Tabla 12. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-III. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p -value < 0,05)

La Figura 44 muestra la velocidad frente al DBH de cada árbol y la Figura 45 muestra el módulo elástico frente al DBH en cada medición. Se aprecia como la velocidad en junio es superior a la de septiembre, aunque el aumento de MoE entre la medida de invierno y de verano es mucho más evidente.

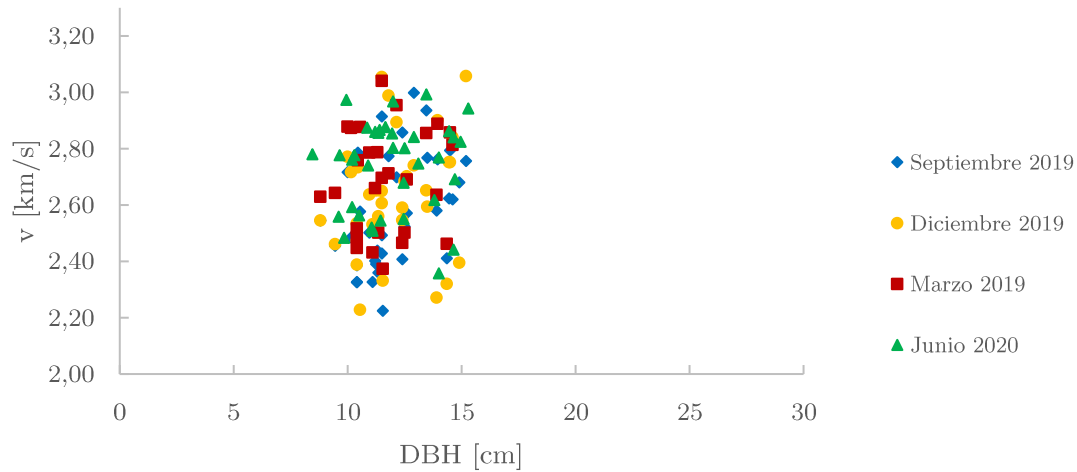


Figura 44. N-III: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

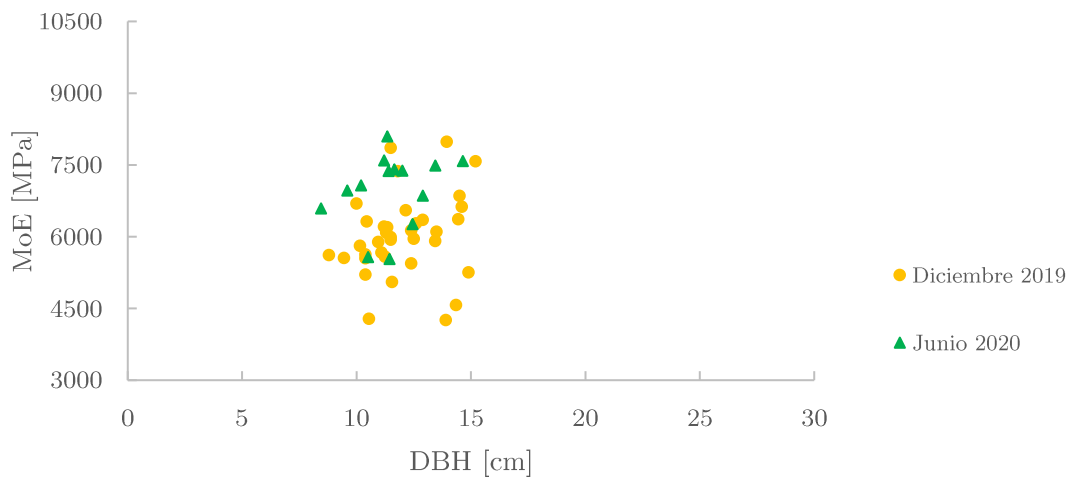


Figura 45. N-III: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición

La Figura 58 muestra la variación de la velocidad en el tiempo y la Figura 59 la del MoE. Se observa como ambos parámetros van aumentando con el tiempo.

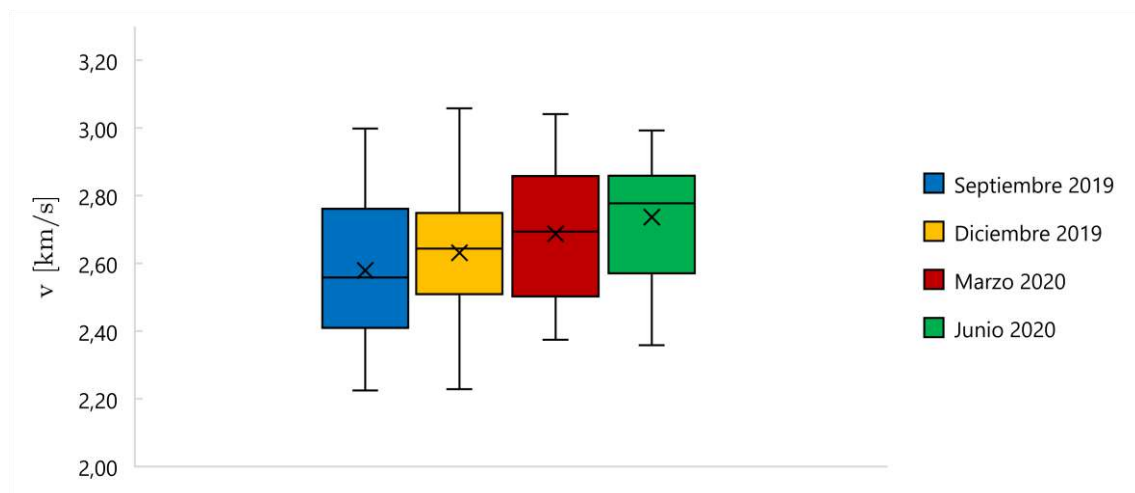


Figura 46. N-III: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas

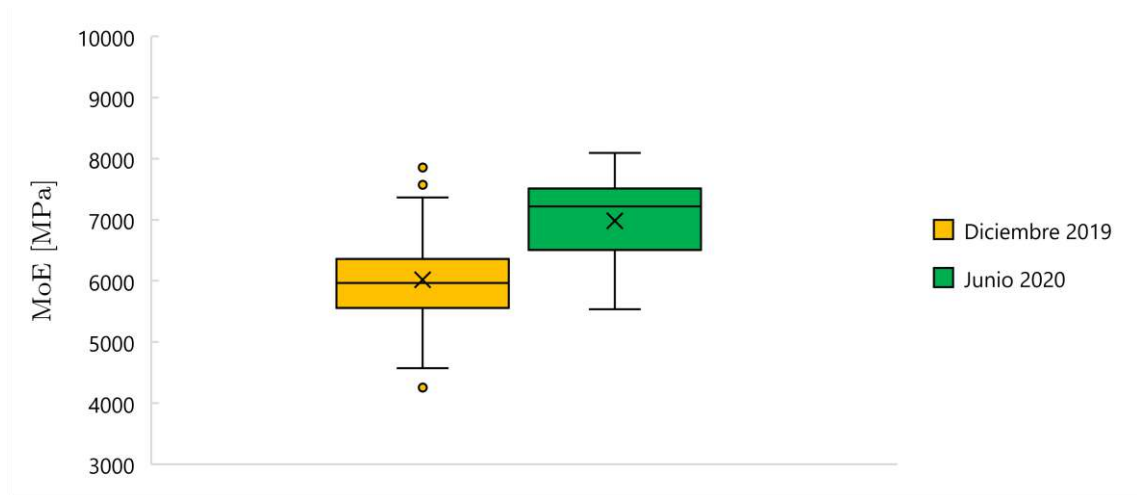


Figura 47. N-III: MoE en las mediciones realizadas

N-IV. Plantación Clonal de nogales en Arzúa (La Coruña)

La Tabla 13 recoge los datos de DBH, velocidad, densidad y MoE obtenidos en la medida de noviembre de 2019 agrupados por clones.

		Noviembre 2019
D117	DBH [cm]	10,7 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	868 ± 18
	v [km/s]	2,33 ± 0,06
	MoE [MPa]	4710 ± 239
D15	DBH [cm]	10,3 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	874 ± 16
	v [km/s]	2,37 ± 0,06
	MoE [MPa]	4926 ± 221
D48	DBH [cm]	9,5 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	825 ± 18
	v [km/s]	2,45 ± 0,06
	MoE [MPa]	4967 ± 239
D51	DBH [cm]	11,0 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	916 ± 18
	v [km/s]	2,47 ± 0,06
	MoE [MPa]	5588 ± 239
D53	DBH [cm]	10,9 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	901 ± 16
	v [km/s]	2,47 ± 0,06
	MoE [MPa]	5489 ± 221
DA	DBH [cm]	12,3 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	846 ± 18
	v [km/s]	2,27 ± 0,06
	MoE [MPa]	4548 ± 239
DE	DBH [cm]	10,0 ± 0,7
	ρ [kg/m ³]	868 ± 19
	v [km/s]	2,44 ± 0,07
	MoE [MPa]	5153 ± 262
DN	DBH [cm]	11,2 ± 0,9
	ρ [kg/m ³]	898 ± 25
	v [km/s]	2,35 ± 0,09
	MoE [MPa]	4973 ± 338

Tabla 13. Media y error estándar por clon del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-IV

La Figura 48 muestra la velocidad frente al DBH y la Figura 49 el MoE frente al DBH de cada clon. Se aprecia como el clon DA suele tener los mayores DBH y los clones D51 y D53 la mayor velocidad. El clon D51 es además el que tiene mayor MoE.

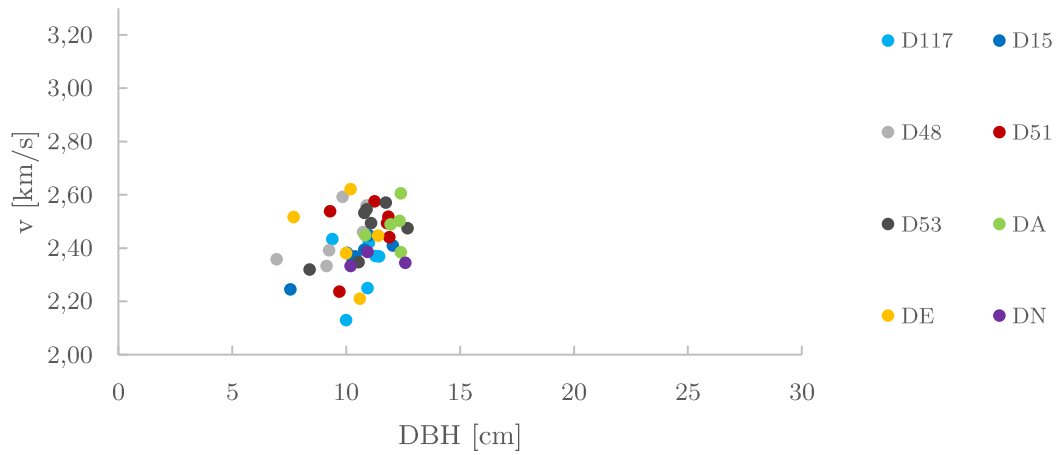


Figura 48. N-IV: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

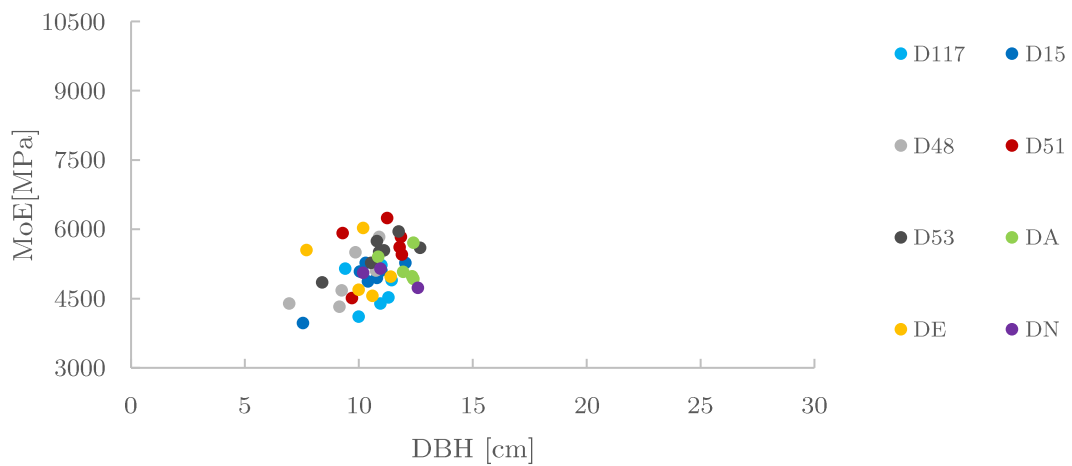


Figura 49. N-IV: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición

N-V. Plantación Clonal de nogales en Carpio (Toledo)

La Tabla 14 muestra agrupados por clon los datos de DBH, velocidad, densidad y MoE obtenidos en la medida de noviembre de 2019.

		Noviembre 2019
D117	DBH [cm]	9,3 ± 0,7
	ρ [kg/m ³]	853 ± 19
	v [km/s]	2,44 ± 0,07
	MoE [MPa]	5096 ± 262
D15	DBH [cm]	8,9 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	787 ± 18
	v [km/s]	2,51 ± 0,06
	MoE [MPa]	4994 ± 239
D48	DBH [cm]	8,1 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	766 ± 18
	v [km/s]	2,57 ± 0,06
	MoE [MPa]	5069 ± 239
D51	DBH [cm]	8,6 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	788 ± 18
	v [km/s]	2,52 ± 0,06
	MoE [MPa]	5007 ± 239
D53	DBH [cm]	9,5 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	841 ± 18
	v [km/s]	2,43 ± 0,06
	MoE [MPa]	4978 ± 239
DA	DBH [cm]	10,7 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	830 ± 18
	v [km/s]	2,39 ± 0,06
	MoE [MPa]	4743 ± 239
DE	DBH [cm]	9,3 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	784 ± 18
	v [km/s]	2,64 ± 0,06
	MoE [MPa]	5477 ± 239
DN	DBH [cm]	7,6 ± 0,7
	ρ [kg/m ³]	837 ± 19
	v [km/s]	2,30 ± 0,07
	MoE [MPa]	4419 ± 262

Tabla 14. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-V

Las Figura 50 y Figura 51 muestran la velocidad frente al DBH y el MoE frente al DBH de los clones, respectivamente. Se aprecia como el clon con mayores

DBH de forma general es el DA y con menores el DN. Si nos fijamos en la velocidad y el MoE, el clon con mejor comportamiento (valores más altos) es el DE y el que tiene peor comportamiento al igual que pasaba con el DBH es el DN.

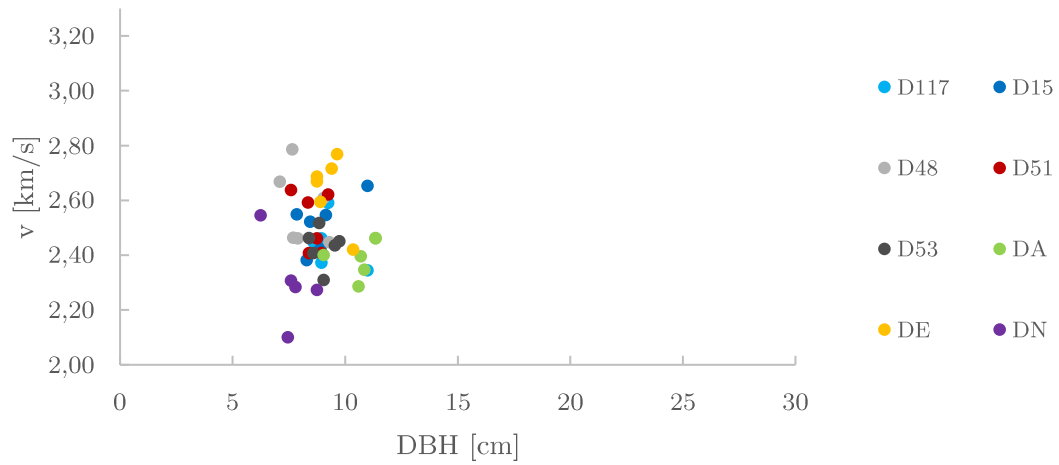


Figura 50. N-V: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

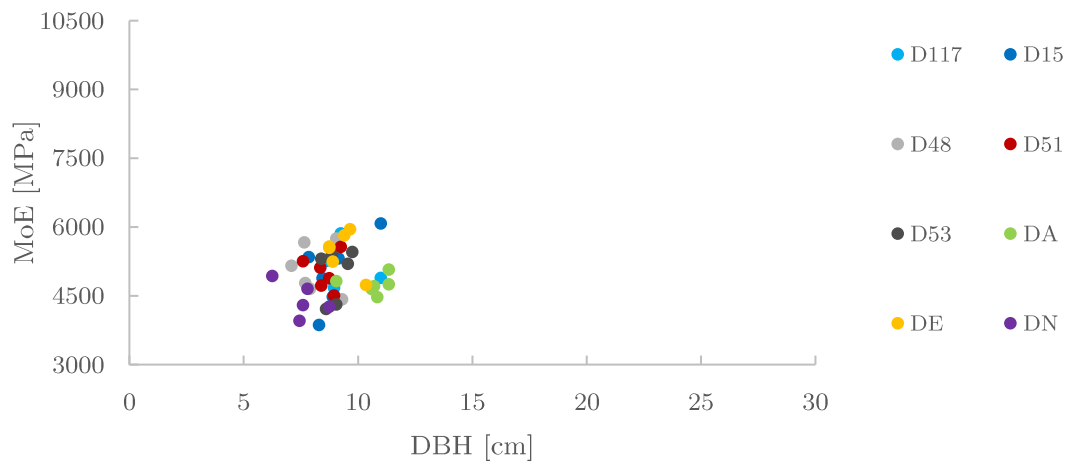


Figura 51. N-V: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición

N-VI. Plantación Clonal de nogales en el IFAPA (Granada)

Los datos de las mediciones se encuentran agrupados por clones. La Tabla 15 muestra la variación del DBH, densidad, velocidad y MoE en el tiempo.

		Septiembre 2019	Noviembre 2019	Marzo 2020
D117	DBH [cm]	13,4 ± 0,9	13,4 ± 0,9	13,3 ± 0,9
	ρ [kg/m ³]	-	914 ± 19	-
	v [km/s]	2,47 ± 0,05	2,24 ± 0,07	2,44 ± 0,05
	MoE [MPa]	-	4603 ± 262	-
D15	DBH [cm]	6,3 ± 1,0	6,3 ± 1,0	6,3 ± 1,0
	ρ [kg/m ³]	-	844 ± 22	-
	v [km/s]	2,50 ± 0,05	2,28 ± 0,08	2,47 ± 0,05
	MoE [MPa]	-	4373 ± 292	-
D48	DBH [cm]	9,5 ± 0,8	9,5 ± 0,6	9,5 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	-	813 ± 16	-
	v [km/s]	2,47 ± 0,04	2,31 ± 0,06	2,58 ± 0,04
	MoE [MPa]	-	4346 ± 221	-
D51	DBH [cm]	9,4 ± 0,8	9,9 ± 0,6	9,9 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	-	853 ± 18	-
	v [km/s]	2,46 ± 0,04	2,30 ± 0,06	2,39 ± 0,05
	MoE [MPa]	-	4505 ± 239	-
D53	DBH [cm]	11,8 ± 0,8	11,9 ± 0,6	11,9 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	-	891 ± 18	-
	v [km/s]	2,52 ± 0,04	2,43 ± 0,06	2,56 ± 0,04
	MoE [MPa]	-	5269 ± 239	-
DA	DBH [cm]	12,0 ± 0,8	12,2 ± 0,6	12,2 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	-	874 ± 16	-
	v [km/s]	2,50 ± 0,04	2,35 ± 0,06	2,51 ± 0,04
	MoE [MPa]	-	4847 ± 221	-
DE	DBH [cm]	11,7 ± 0,8	11,8 ± 0,6	11,8 ± 0,6
	ρ [kg/m ³]	-	821 ± 18	-
	v [km/s]	2,72 ± 0,04	2,61 ± 0,06	2,77 ± 0,04
	MoE [MPa]	-	5589 ± 239	-
DN	DBH [cm]	11,1 ± 0,8	11,2 ± 0,7	11,2 ± 0,7
	ρ [kg/m ³]	-	901 ± 18	-
	v [km/s]	2,33 ± 0,04	2,16 ± 0,06	2,30 ± 0,04
	MoE [MPa]	-	4197 ± 239	-

Tabla 15. Media y error estándar del DBH, densidad, velocidad y MoE para la plantación N-VI

La Figura 52 muestra la velocidad frente al DBH y la Figura 53 el MoE frente al DBH. En ambas gráficas se observa como el DBH generalmente es menor

en el clon D15 y mayor en el clon D117. Se aprecia además como el clon DE tiene en la mayoría de los casos la mayor velocidad y el DN la menor. El comportamiento de los clones respecto al MoE es similar al de la velocidad, aunque existen variaciones debido a la densidad.

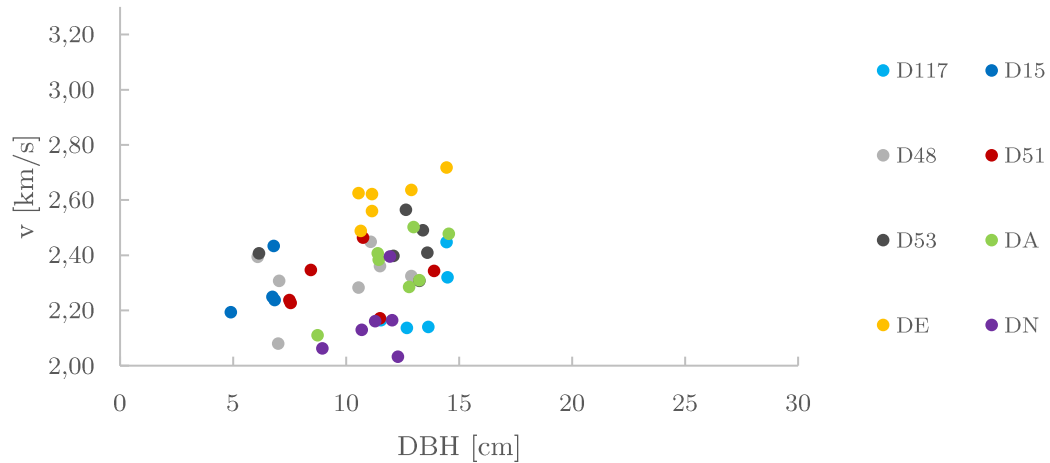


Figura 52. N-VI: Resultados de la velocidad frente al DBH obtenidos en cada medición

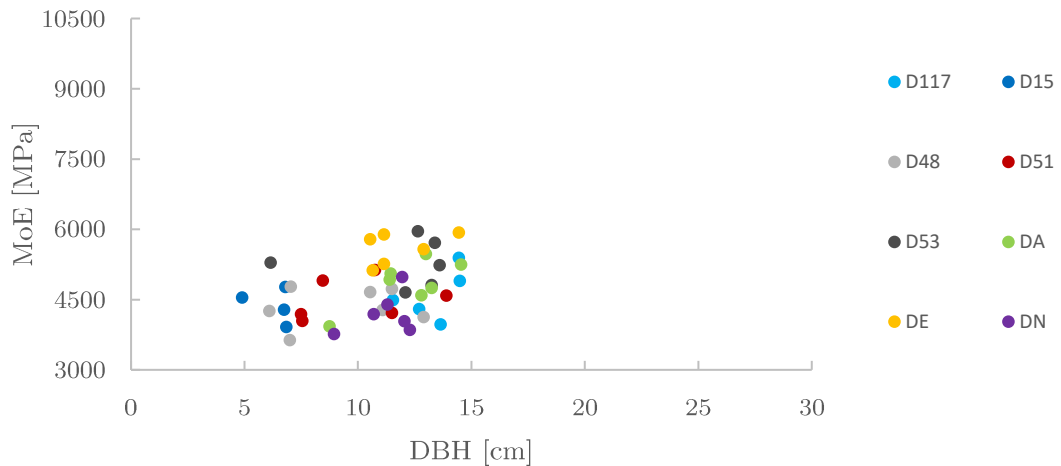


Figura 53. N-VI: Resultados del MoE frente al DBH obtenidos en cada medición

La Figura 54 muestra la variación de la velocidad entre las diferentes medidas para cada clon. Se aprecia como el comportamiento en todos los clones es similar, en la medida de noviembre la velocidad es siempre menor, mientras que en las de septiembre y marzo es similar. El clon con menor velocidad de propagación es el DN.

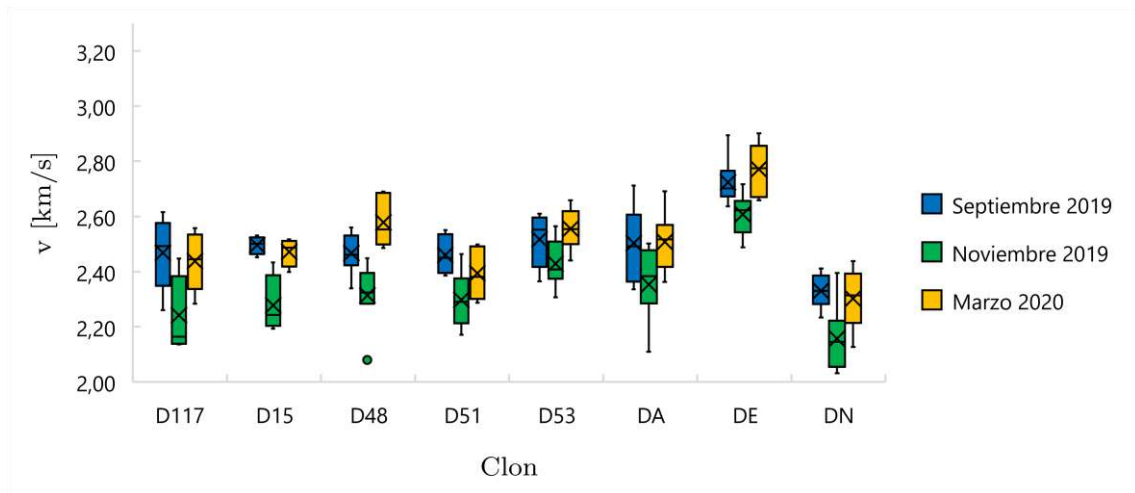


Figura 54. N-VI: Velocidad de propagación en las mediciones realizadas

5. Discusión de resultados

En este apartado se van a comparar las plantaciones según múltiples variables como son el clon y la edad de las plantaciones y su interacción. Se han realizado análisis estadísticos de la varianza para comparar los resultados de la velocidad de propagación de la onda en el árbol y el MoE.

Se realizan comparaciones tomando una variable como condicionante. Por ejemplo, se analizan las diferencias con distintos verdes en un mismo clon o la variabilidad entre clones con los mismos verdes. En el caso de las plantaciones sin diseño experimental se realiza un análisis de la varianza de una vía no paramétrico, el test de *Kruskal-Wallis*. Las plantaciones con diseño experimental (C-VI, N-IV, N-V y N-VI) se estudian con el test paramétrico ANOVA factorial y comparación de medias con el Test de *Tukey*.

5.1 Choperas

5.1.1 Comparación del clon I-214 de distintos verdes

La Tabla 16 resume los datos obtenidos del análisis estadístico. Se realiza un análisis de la varianza con el test no paramétrico *Kruskal-Wallis*, puesto que no todas estas plantaciones no tienen un diseño experimental previo.

Plantación	Verdes	Medición	Número de árboles	Grupos estadísticos	
				Velocidad	MoE
C-I	13	Octubre 2018	15	3,34 ± 0,02 A	8376 ± 105 a
C-II	9	Febrero 2019	54	3,05 ± 0,01 B	6676 ± 42 b
C-VI	5	Diciembre 2019	48	3,02 ± 0,01 B	5665 ± 73 c
C-VII	4	Diciembre 2019	30	2,85 ± 0,02 C	4831 ± 156 d
Test <i>Kruskal-Wallis</i>				p<0,05	p<0,05

Tabla 16. Comparación estadística del clon I-214 para distintos verdes. Las letras distintas (A, B, C y D) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value}<0,05$)

La Figura 55 muestra la comparación de la velocidad, se observa que no existen diferencias significativas entre la velocidad a los 9 verdes de la plantación C-II y la de 5 verdes de la plantación C-VI, ambas pertenecen al grupo estadístico

B. La Figura 56 muestra que existen diferencias significativas en el MoE entre todas las edades, generando 4 grupos estadísticos distintos, y además este parámetro aumenta con la edad, como era de esperar^{18,27,95,98,99}. El aumento del MoE no se produce de manera constante, el incremento de MoE ocurrido entre los 4 y 5 verdes es similar al que ocurre de 5 a 9 verdes, cuando el tiempo transcurrido es 4 veces mayor. Entre la velocidad y el MoE existe una relación de proporcionalidad directa, pero como para determinar el MoE interviene también la densidad que es muy variable, no se observa de forma tan clara la relación entre ambas.

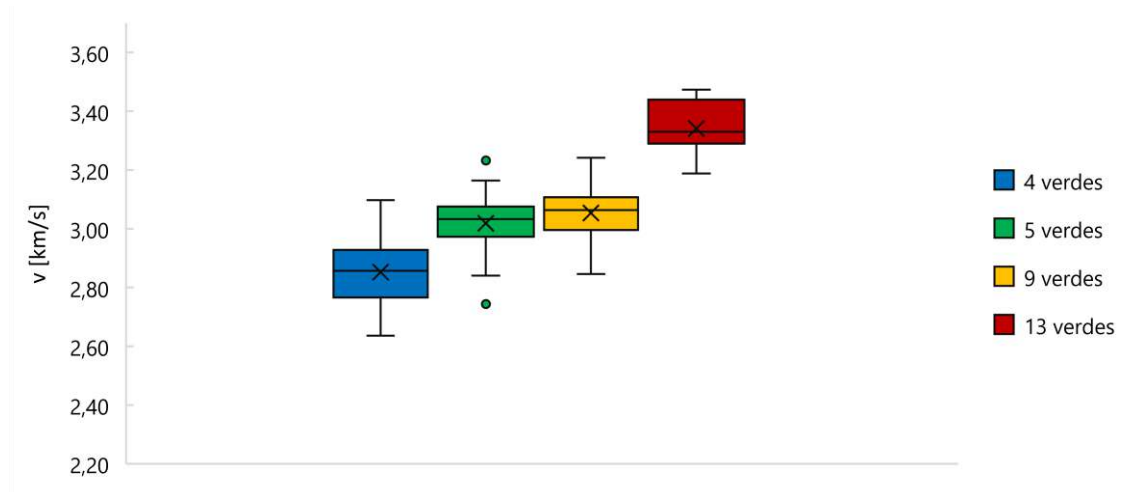


Figura 55. Velocidad de propagación en chopos del clon I-214 de distintos verdes

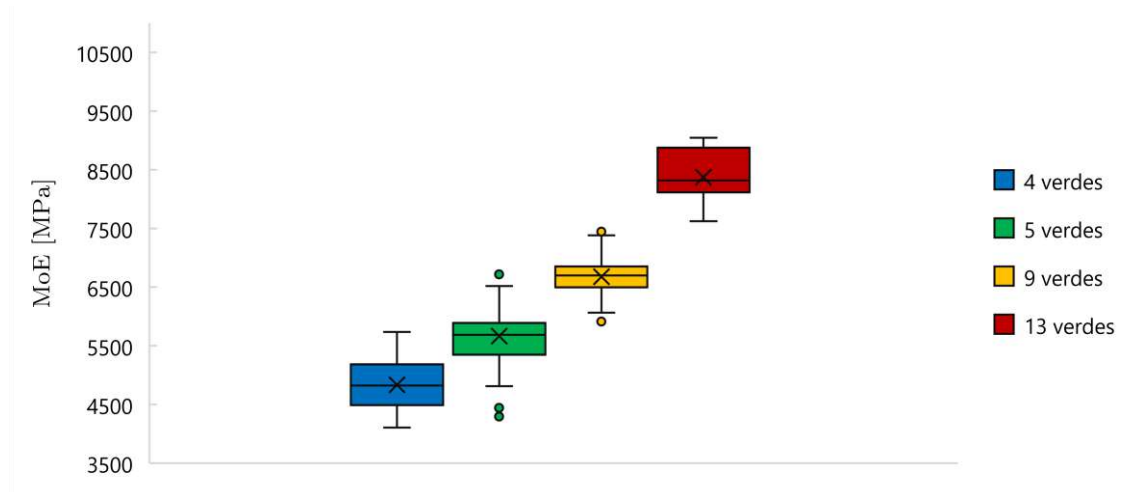


Figura 56. MoE en chopos de clon I-214 de distintos verdes

5.1.2 Comparación del clon MC de distintos verdes

La Tabla 17 muestra la variación de la velocidad y MoE del clon MC según la edad. Estas variaciones son significativas en la velocidad, pero no en el MoE.

Plantación	Verdes	Medición	Número de árboles	Grupos estadísticos	
				Velocidad	MoE
C-IV	9	Junio 2020	15	3,42 ± 0,04 A	8534 ± 156 a
C-V	7	Junio 2020	15	3,48 ± 0,02 B	8862 ± 121 a
Test Kruskal-Wallis				p<0,05	p>0,05

Tabla 17. Comparación estadística del clon MC para distintos verdes. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value}<0,05$)

La Figura 57 muestra la variación de la velocidad de propagación en el clon MC con la edad, observándose dos grupos estadísticos. La Figura 58 la variación del MoE con la edad, aunque se observa cierta variación en los resultados, estadísticamente pertenecen al mismo grupo, lo que indica que no hay diferencias significativas entre ambas edades.

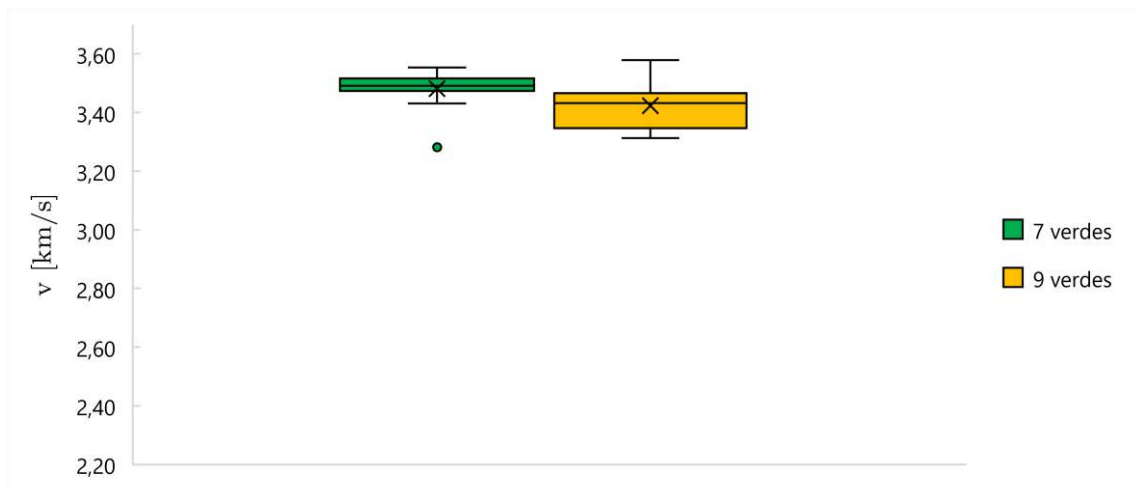


Figura 57. Velocidad de propagación en chopos del clon MC de distintos verdes

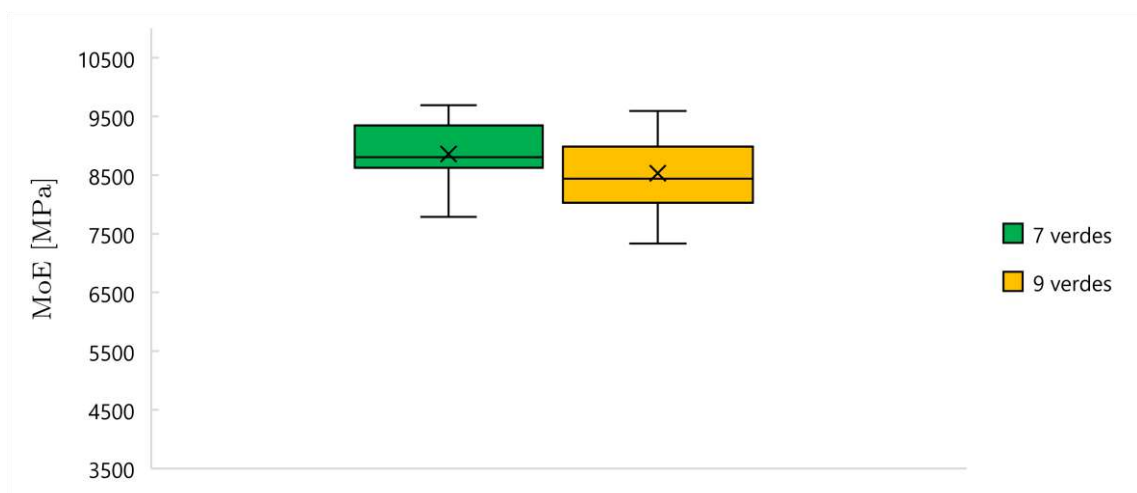


Figura 58. MoE en chopos de clon MC de distintos verdes

5.1.3 Comparación de clones de 9 verdes

La Tabla 18 muestra la variación de la velocidad y en el MoE en diferentes clones de los mismos verdes. La variación es significativa en el clon I-214 con

respecto a los clones Luisa Avanzo y MC, que pertenecen al mismo grupo estadístico en los dos parámetros.

Plantación	Clon	Medición	Número de árboles	Grupos estadísticos	
				Velocidad	MoE
C-II	I-214	Octubre 2018	54	3,01 ± 0,01 A	7066 ± 43 a
C-III	Luisa Avanzo	Junio 2020	15	3,32 ± 0,03 B	7986 ± 196 b
C-IV	MC	Junio 2020	15	3,42 ± 0,04 B	8534 ± 156 b
Test Kruskal-Wallis				p<0,05	p<0,05

Tabla 18. Comparación estadística de clones de chopo de 9 verdes. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value}<0,05$)

La Figura 59 muestra la variación de la velocidad en los distintos clones. Se observa como la velocidad en los clones de MC y Luisa Avanzo no tiene diferencias significativas, mientras que la obtenida en el clon I-214 es inferior. La Figura 60 muestra la variación del MoE en los tres clones, cuyo comportamiento es análogo al de velocidad. El MoE de los clones de MC y Luisa Avanzo carece de diferencias significativas, y el MoE del clon I-214 es menor y presenta menos dispersión.

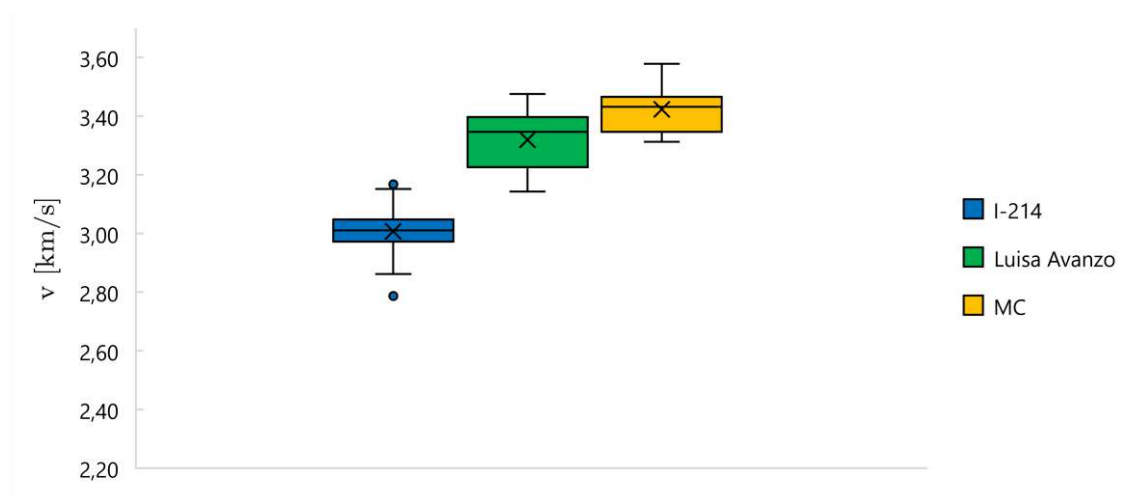


Figura 59. Velocidad de propagación de clones de chopo de 9 verdes

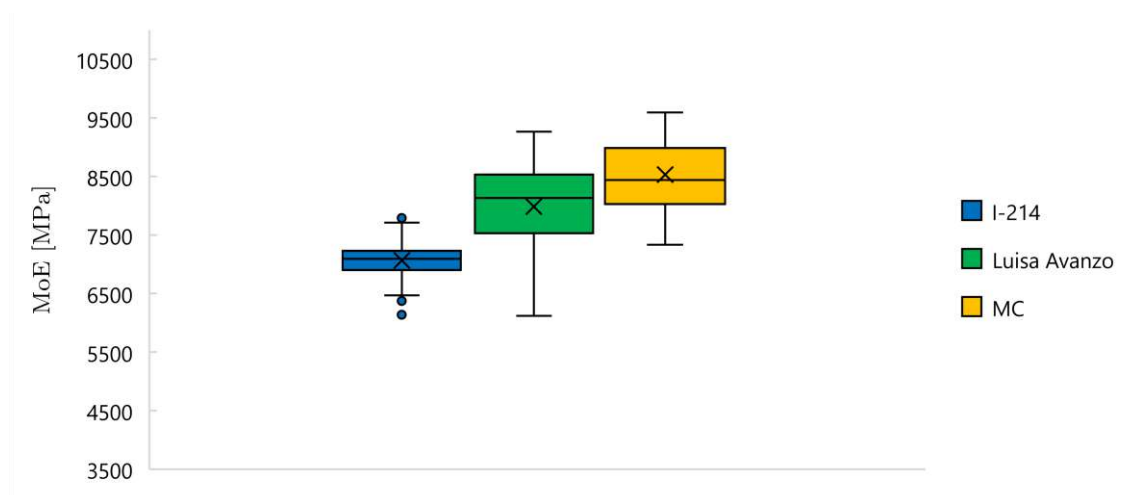


Figura 60. MoE en clones de chopo de 9 verdes

5.1.4 Comparación de clones de 5 verdes

La Tabla 19 muestra la variación de la velocidad y el MoE en los clones Unal, Beaupré, I-214 y Raspalje de los mismos verdes y medidos en el mismo periodo. Todos los clones se encuentran en el mismo grupo estadístico sin diferencias significativas, a excepción del clon I-214.

Plantación	Clon	Medición	Número de árboles	Grupos estadísticos	
				Velocidad	MoE
C-VI	Unal	Diciembre 2019	41	3,24 ± 0,02 A	7366 ± 116 a
	Beaupré	Diciembre 2019	42	3,27 ± 0,01 A	7521 ± 91 a
	I-214	Diciembre 2019	48	3,02 ± 0,01 B	5665 ± 73 b
	Raspalje	Diciembre 2019	39	3,25 ± 0,01 A	6887 ± 119 a
Test de Tukey HSD				p<0,05	p<0,05

Tabla 19. Comparación estadística de clones de chopo de 5 verdes. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value}<0,05$)

La Figura 61 muestra la velocidad de propagación en los clones y la Figura 62 el MoE. En ambos casos, se observa que los resultados de los clones Unal, Beaupré y Raspalje son similares, y para el clon I-214 es menor. Cabe señalar que los clones Unal, Beaupré y Raspalje provienen del mismo híbrido (*Populus x interamericana*), lo que puede explicar sus similitudes estadísticas.

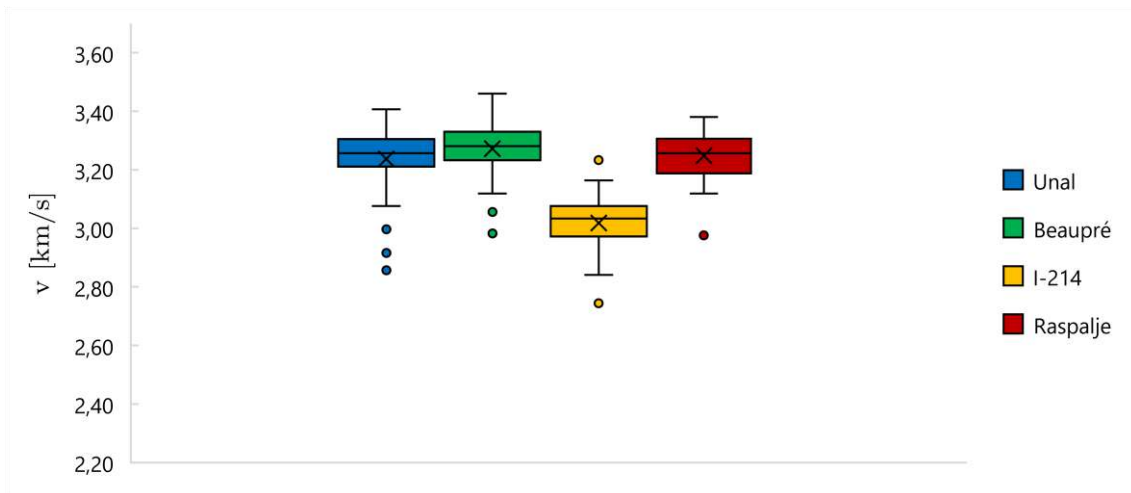


Figura 61. Velocidad de propagación en clones de chocho de 5 verdes

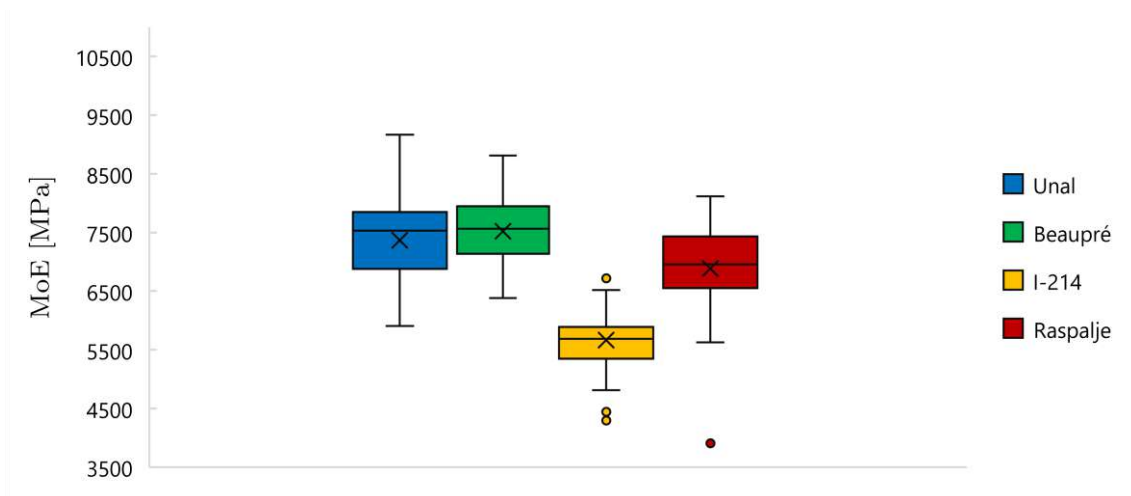


Figura 62. MoE en clones de chocho de 5 verdes

5.2 Nogales

5.2.1 Comparación de nogales híbridos

La Tabla 20 muestra la variación existente entre la velocidad y el MoE obtenidos en nogales híbridos de edades consideradas similares en el caso de los nogales. Esta tabla además permite comparar el comportamiento de dos tipos de híbridos, así como el efecto de la edad en ellos. En el caso de la velocidad, se obtiene que las 3 plantaciones medidas pertenecen al mismo grupo estadístico. Sin embargo, en el caso del MoE, se clasifican en dos grupos distintos, uno para cada tipo de clon.

Plantación	Clon	Verdes	Medición	Número de árboles	Grupos estadísticos	
					Velocidad	MoE
N-I	Ng23xRa	14	Diciembre 2019	30	2,71 ± 0,03 A	7194 ± 156 a
N-II	Mj209xRa	11	Diciembre 2019	29	2,58 ± 0,03 A	5804 ± 136 b
N-III	Mj209xRa	10	Diciembre 2019	36	2,63 ± 0,03 A	6015 ± 143 b
Test Kruskal-Wallis					p>0,05	p<0,05

Tabla 20. Comparación estadística de los nogales híbridos. Las letras distintas (A, B y C) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value}<0,05$)

La Figura 63 muestra la velocidad de propagación en cada híbrido y la Figura 64 el MoE. Como ya se ha comprobado, la velocidad carece de cambios significativos, pero en el MoE se observa como los valores obtenidos para el híbrido Ng23xRa son superiores.

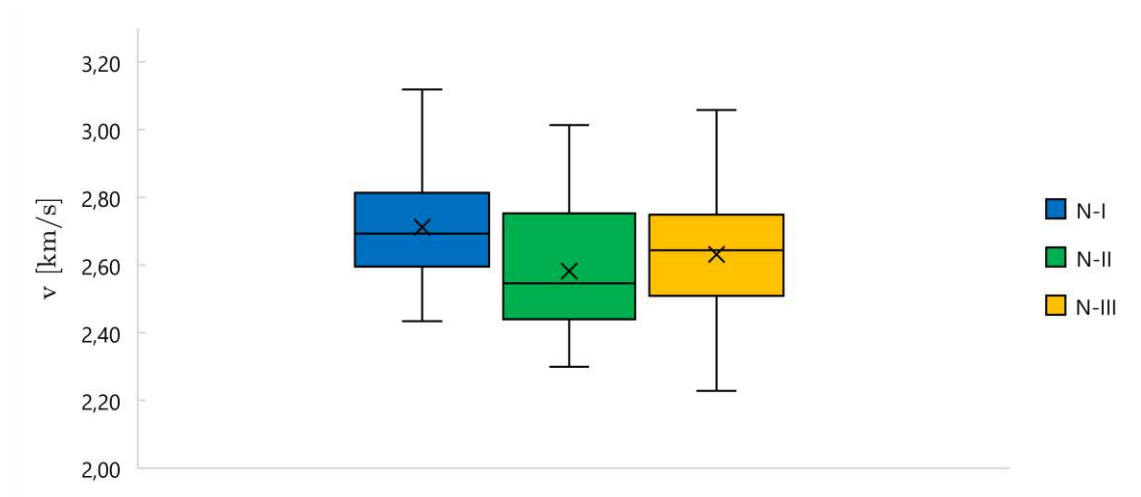


Figura 63. Velocidad de propagación de los nogales híbridos

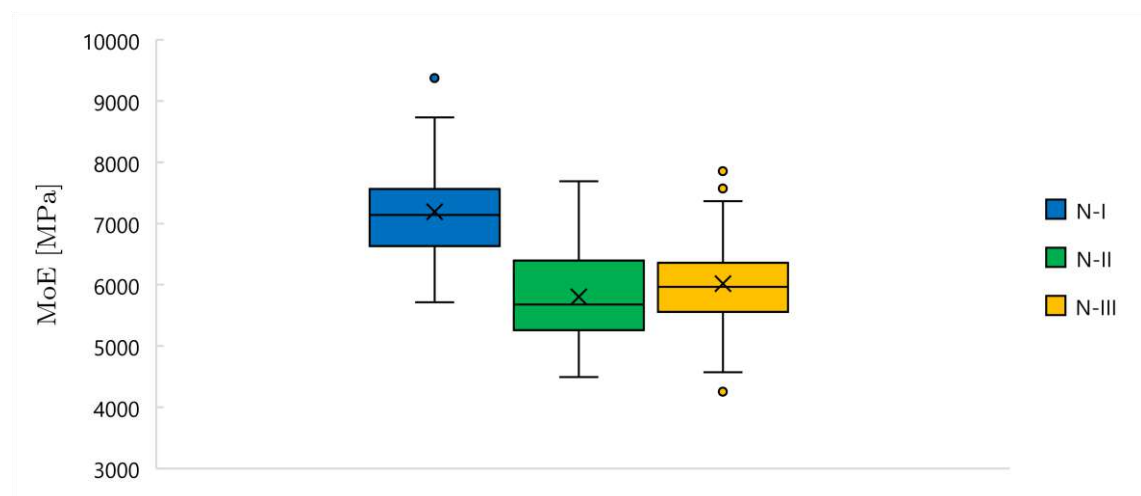


Figura 64. MoE de los nogales híbridos

5.2.2 Comparación de nogales clonales

La Tabla 21 muestra la variación de la velocidad y el MoE en plantaciones de nogales clonales, considerando todas las variedades de clones, se pretende evaluar la influencia de la localización. En cuanto a la velocidad, se obtiene que las plantaciones clonales de Arzúa e IFAPA no presentan diferencias significativas entre ellas, pero sí hay diferencias con la plantación de Carpio. En el caso del MoE, hay similitudes estadísticas de la plantación N-IV con las otras dos plantaciones, pero las plantaciones N-V y N-VI pertenecen a grupos estadísticos distintos.

Plantación	Localización	Verdes	Medición	Número de árboles	Grupos estadísticos		
					Velocidad	MoE	
N-IV	Arzúa	7	Noviembre 2019	46	2,48 ± 0,02 A	4973 ± 79 ab	
N-V	Carpio	6	Noviembre 2019	46	2,39 ± 0,02 B	5044 ± 79 a	
N-VI	IFAPA	6	Noviembre 2019	47	2,33 ± 0,02 A	4716 ± 91 b	
Test de Tukey HSD						p<0,05	p<0,05

Tabla 21. Comparación estadística de los nogales clonales según su ubicación. Las letras distintas (A y B) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% ($p\text{-value}<0,05$)

La Tabla 22 muestra la variación de la velocidad y el MoE según el clon de nogal de las plantaciones N-IV, N-V y N-VI. Este análisis no tiene en cuenta la localidad, solo estudia la variación en los clones. Analizando los grupos estadísticos se puede observar, respecto de la velocidad que todos los clones tienen diferencias significativas con algún otro excepto el clon D51, cuya velocidad es homogénea con la del resto de clones. Todos los clones son homogéneos entre ellos en cuanto a velocidad excepto los clones DE y DN, que tienen diferencias entre ellos y con algunos de los demás clones. Los resultados del MoE son bastante similares, los clones D51 y D117 son los únicos que no tienen diferencias significativas con ninguno otro.

Clon	Medición	Número de árboles	Grupos estadísticos	
			Velocidad	MoE
D117	Noviembre 2019	5	2,43 ± 0,03 AB	4798 ± 126 abc
D15	Noviembre 2019	6	2,40 ± 0,03 AB	4820 ± 144 ab
D48	Noviembre 2019	6	2,44 ± 0,04 AC	4770 ± 137 ab
D51	Noviembre 2019	6	2,43 ± 0,03 ABC	5033 ± 151 abc
D53	Noviembre 2019	6	2,44 ± 0,02 AC	5258 ± 114 ac
DA	Noviembre 2019	6	2,40 ± 0,03 AB	4914 ± 96 ab
DE	Noviembre 2019	6	2,57 ± 0,03 C	5422 ± 115 c
DN	Noviembre 2019	5	2,25 ± 0,04 B	4443 ± 125 b
Test de Tukey HSD			p<0,05	p<0,05

Tabla 22. Comparación estadística de los nogales clonales según el clon. Las letras distintas (A, B y C) indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% (p -value<0,05)

La Figura 65 muestra la velocidad en los clones obtenida en cada localización. Se observa que de forma generalizada la velocidad suele ser mayor en los nogales de Carpio (excepto para el clon D53, DA y DN). Observando los clones de forma independiente, se aprecia que el clon que en el que se obtuvo menor velocidad en todas las localizaciones es el DN.

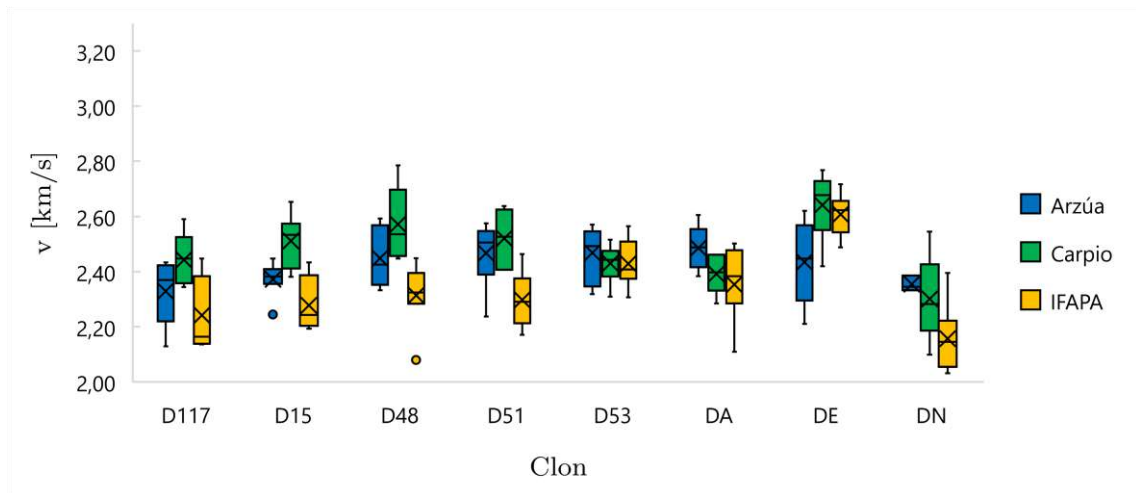


Figura 65. Velocidad de propagación de los nogales clonales

La Figura 66 muestra el MoE de cada clon en cada localización. Se observa como el MoE no es superior de forma generalizada para ninguna ubicación. El clon DN, al igual que ocurría con la velocidad, es el que presenta menor MoE en las tres ubicaciones.

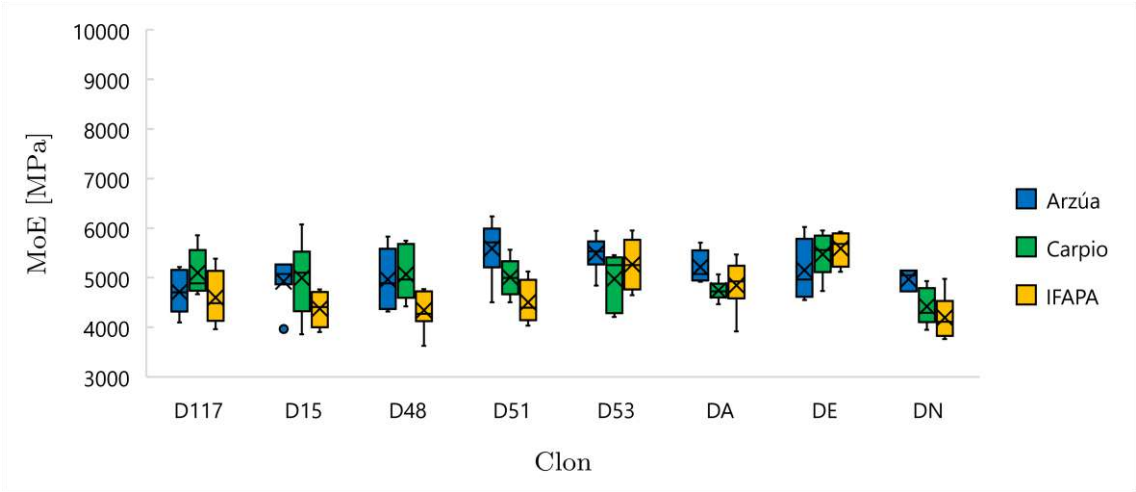


Figura 66. MoE de los nogales clonales

6. Conclusiones

Este trabajo se centra en la determinación del MoE en árboles en pie mediante ondas acústicas, comparando las variaciones de velocidad y MoE de las diferentes medidas y plantaciones según distintos condicionantes. A continuación, se exponen las principales conclusiones obtenidas:

- El DBH no tiene correlación ni con la velocidad ni con el MoE, en ninguna de las dos especies estudiadas. En todos los casos el coeficiente de correlación, R^2 , era inferior a 0,2.
- La velocidad de propagación no siempre aumenta con la densidad, la relación entre ambas variables no es contundente. El MoE si aumenta con el aumento de la densidad y de velocidad, ya que está directamente relacionado con ambos.
- La velocidad no siempre varía con las estaciones, en medidas continuas. En los chopos, la velocidad de propagación es mayor en la medida de invierno (noviembre y diciembre). La velocidad medida en los nogales es más homogénea, varía menos con las estaciones, y al contrario que en los chopos en la medida de invierno se suele obtener menor velocidad.
- El MoE, y por tanto la velocidad, depende del genotipo. El clon I-214 es el chopo con menor MoE, tanto en la comparación de 9 verdes como en la de 5 verdes. El resto de clones de chopo tienen un comportamiento similar en los análisis realizados. El MoE de los nogales clonales depende en gran medida de la ubicación, dependiendo de su localización tienen mayor o menor MoE. De forma general, se puede decir que el clon de nogal con menor MoE independientemente de la localización es el DN.
- La rigidez aumenta generalmente con la edad. En el chopo de clon I-214, el MoE aumenta con la edad, aunque no lo hace de forma proporcional. El MoE en los nogales híbridos también aumenta con la edad.

7. Bibliografía

1. Laurent, A., Meer, Y. & Villeneuve, C. Comparative Life Cycle Carbon Footprint of a Non-Residential Steel and Wooden Building Structures. *Curr. Trends For. Res.* **2**, (2018).
2. Valsta, L. *et al.* Use of Forests and Wood Products to Mitigate Climate Change. in *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change* (eds. Bravo, F., Jandl, R., LeMay, V. & Gadow, K.) vol. 17 205–218 (Springer, 2017).
3. Shema, A. I., Balarabe, M. K. & Alfa, M. T. Energy efficiency in residential buildings using nano-wood composite materials. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* **9**, 853–864 (2018).
4. Seo, J., Wi, S. & Kim, S. Evaluation and analysis of the building energy saving performance by component of wood products using energyPlus. *J. Korean Wood Sci. Technol.* **44**, 655–663 (2016).
5. Wennberg, A. Food and Agriculture Organization of the United Nations. in *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition* (eds. Isebrands, J. G. & Richardson, J.) 628–630 (Wallingford, 2014). doi:10.1016/B978-0-12-386454-3.00988-X.
6. Fady, B. *et al.* Walnut demonstrates strong genetic variability for adaptive and wood quality traits in a network of juvenile field tests across Europe. *New For.* **25**, 211–225 (2003).
7. Erskine, P. D. & Catterall, C. P. Production Versus Rainforest Biodiversity: Trade-offs or Synergies in Farm Forestry Systems? in *Rainforest CRC* (2003). doi:10.1128/AAC.03728-14.
8. Reid, M. Fruit quality and its biological basis. *Postharvest Biol. Technol.* **29**, 107–108 (2003).
9. Wang, X., Carter, P., Ross, R. J. & Brashaw, B. K. Acoustic assessment of wood quality of raw forest materials - A path to increased profitability. *For. Prod. J.* **57**, 6–14 (2007).
10. Kollert, W. & Lebedys, A. Poplar cultivation in Europa and Spain. in *III Poplar Symposium*.
11. Aletá, N. Current Research in Spain on Walnut for Wood Production. in

- Black Council REsearch Symposium* 153–155 (2004).
12. Evans, R., Ilic, J. & Matheson, A. C. Rapid estimation of solid wood stiffness using SilviScan. in *Proc: Forest Products Research Conference, Session 5* (eds. Schimleck, L. & Blakemore, P.) 49–50 (2000).
 13. Knowles, R. L., Hansen, L. W., Wedding, A. & Downes, G. Evaluation of non-destructive methods for assessing stiffness of Douglas fir trees. *New Zeal. J. For. Sci.* **34**, 87–101 (2004).
 14. Meder, R., Thumm, A. & Marston, D. Sawmill trial of at-line prediction of recovered lumber stiffness by NIR spectroscopy of *Pinus radiata* cants. *J. Near Infrared Spectrosc.* **11**, 137–143 (2003).
 15. Hanhijärvi, A. & Ranta-Maunus, A. *Development of strength grading of timber using combined measurement techniques*. VTT, Espoo (2008).
 16. Wang, X. *et al.* Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. *Wood Fiber Sci.* **33**, 522–533 (2001).
 17. Carter, P., Briggs, D., Ross, R. J. & Wang, X. Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. *USDA For. Serv. - Gen. Tech. Rep. PNW* 121–129 (2005).
 18. Chauhan, S. S. & Walker, J. C. F. Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine. *For. Ecol. Manage.* **229**, 388–394 (2006).
 19. Lasserre, J. P., Mason, E. G. & Watt, M. S. Assessing corewood acoustic velocity and modulus of elasticity with two impact based instruments in 11-year-old trees from a clonal-spacing experiment of *Pinus radiata* D. Don. *For. Ecol. Manage.* **239**, 217–221 (2007).
 20. Wang, X. Acoustic measurements on trees and logs: A review and analysis. *Wood Science and Technology* vol. 47 965–975 (2013).
 21. Paradis, N., Auty, D., Carter, P. & Achim, A. Using a standing-tree acoustic tool to identify forest stands for the production of mechanically-graded lumber. *Sensors (Switzerland)* **13**, 3394–3408 (2013).
 22. Legg, M. & Bradley, S. Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics: A review. *J. Acoust. Soc. Am.* **139**, 588–604 (2016).
 23. Newton, P. F. Acoustic-based non-destructive estimation of wood quality attributes within standing red pine trees. *Forests* **8**, 380 (2017).
 24. Essien, C., Via, B. K., Gallagher, T., McDonald, T. & Eckhardt, L. Distance error for determining the acoustic velocity of standing tree using tree morphological, physical and anatomical properties. *J. Indian Acad. Wood Sci.* **15**, 52–60 (2018).

25. Arciniegas, A., Prieto, F., Brancheriau, L. & Lasaygues, P. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. *Trees - Structure and Function* vol. 28 1559–1567 (2014).
26. Espinosa, L., Bacca, J., Prieto, F., Lasaygues, P. & Brancheriau, L. Accuracy on the time-of-flight estimation for ultrasonic waves applied to non-destructive evaluation of standing trees: A comparative experimental study. *Acta Acust. united with Acust.* **104**, 429–439 (2018).
27. Rescalvo, F. J., Ripoll, M. A., Suarez, E. & Gallego, A. Effect of location, clone, and measurement season on the propagation velocity of poplar trees using the Akaike information criterion for arrival time determination. *Materials (Basel)*. **12**, (2019).
28. Haines, D. W., Leban, J. M. & Herbé, C. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Sci. Technol.* **30**, 253–263 (1996).
29. Ouis, D. On the frequency dependence of the modulus of elasticity of wood. *Wood Sci. Technol.* **36**, 335–346 (2002).
30. Hsu, C. Y. Radiata pine wood anatomy structure and biophysical properties. 147.
31. Wang, X. *et al.* Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs. *Wood Fiber Sci* **36**, 368–377.
32. Lowe, M. J. S., Alleyne, D. N. & Cawley, P. Defect detection in pipes using guided waves. *Ultrasonics* **36**, 147–154 (1998).
33. Rose, J. L. & Nagy, P. B. Ultrasonic Waves in Solid Media. *J. Acoust. Soc. Am.* **107**, 1807–1808 (2000).
34. Su, Z., Ye, L. & Lu, Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review. *J. Sound Vib.* **295**, 753–780 (2006).
35. Andrews, M. Which acoustic speed. in *Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood* 159–165 (2003).
36. Wang, X., Ross, R. J. & Carter, P. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part I. Acoustic wave behavior. *Wood Fiber Sci.* **39**, 28–38 (2007).
37. Wang, X., Ross, R. J. & Carter, P. Acoustic Evaluation of Standing Trees - Recent Research Development. *Proc. 14th Int. Symp. Nondestruct. Test. Wood* 455–466 (2005).
38. Zhang, H., Wang, X. & Ross, R. J. Stress wave propagation on standing trees- Part 1. Time-of-flight measurement and 2D stress wave contour maps. in *16th International Symposium on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood*

- 53–59 (Beijing Forestry University, 2009).
39. Harris, J., Gaul, L. & Hurlebaus, S. Linear Elastic Waves. *Appl. Mech. Rev.* **55**, B26–B26 (2002).
 40. Gay, D., Hoa, S. & Tsai, S. Anisotropic Elastic Media. in *Composite Materials* 1–49 (2002). doi:10.1201/9781420031683.pt2.
 41. Bucur, V. & Perrin, J. R. Slope of grain ultrasonic measurements in living trees and timber. *Holz als Roh- und Werkst. Eur. J. Wood Wood Ind.* **47**, 75–75 (1989).
 42. Bucur, V. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. *Ultrasonics* **21**, 116–126 (1983).
 43. Guitard, D. & Amri, F. E. Mode`les pr_evisionnels de comportement _elastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois r_esineux” (“Off diagonal terms of stiffness matrix of wood”. *Ann. Sci. For.* **44**, 335–358.
 44. Bucur, V. & Rasolofosaon, P. N. J. Dynamic elastic anisotropy and nonlinearity in wood and rock. *Ultrasonics* **36**, 813–824 (1998).
 45. Bucur, V. & Berndt, H. Ultrasonic energy flux deviation and off-diagonal elastic constants of wood. in *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium* vol. 1 697–700 (2001).
 46. Bucur, V. Theory of and Experimental Methods for the Acoustic Characterization of Wood. in *Acoustics of Wood* 39–104 (Springer, 2006). doi:10.1007/3-540-30594-7_4.
 47. Bucur, V. Elastic Constants of Wood Material. in *Acoustics of Wood* vol. 5 105–139 (Springer, 2006).
 48. Bucur, V. Wood Structural Anisotropy and Ultrasonic Parameters. in *Acoustics of Wood* vol. 6 141–169 (Springer, 2006).
 49. Ross, R. J. & Pellerin, R. F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. *Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70* 1–40 (1994).
 50. Divos, F., Denes, L. & Iñiguez, G. Effect of cross-sectional change of a board specimen on stress wave velocity determination. *Holzforschung* **59**, 230–231 (2005).
 51. Strutt, J. W. *The theory of sound. The Theory of Sound* vol. 9781108032 (2011).
 52. Legg, M. & Bradley, S. Measurement of stiffness of standing trees and felled logs using acoustics: A review. *Cit. J. Acoust. Soc. Am.* **139**, 588 (2016).
 53. Mora, C. R. *et al.* Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing Pinus taeda trees. *Can. J. For. Res.* **39**, 1421–1429 (2009).

54. Proto, A. R., Macrí, G., Bernardini, V., Russo, D. & Zimbalatti, G. Acoustic evaluation of wood quality with a non-destructive method in standing trees: A first survey in Italy. *IForest* **10**, 700–706 (2017).
55. Lenzen, F. *et al.* Denoising strategies for time-of-flight data. in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (eds. Time-of-Flight *et al.*) vol. 8200 LNCS 25–45 (Springer, 2013).
56. Mendel, J. M. Tutorial on Higher-Order Statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory: Theoretical Results and Some Applications. *Proc. IEEE* **79**, 278–305 (1991).
57. Li, X., Shang, X., Morales-Esteban, A. & Wang, Z. Identifying P phase arrival of weak events: The Akaike Information Criterion picking application based on the Empirical Mode Decomposition. *Comput. Geosci.* **100**, 57–66 (2017).
58. Mborah, C. & Ge, M. Enhancing manual P-phase arrival detection and automatic onset time picking in a noisy microseismic data in underground mines. *Int. J. Min. Sci. Technol.* **28**, 691–699 (2018).
59. Kolassa, S. Combining exponential smoothing forecasts using Akaike weights. *Int. J. Forecast.* **27**, 238–251 (2011).
60. Akaike, H. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, Tsahkadsor* 267–281 (1973). doi:10.1007/978-1-4612-1694-0_15.
61. Bozdogan, H. Akaike's information criterion and recent developments in information complexity. *J. Math. Psychol.* **44**, 62–91 (2000).
62. Bucur, V. Acoustic Methods as a Nondestructive Tool for Wood Quality Assessment. in *Acoustics of Wood* 217–239 (Springer, 2006). doi:10.1007/3-540-30594-7_8.
63. Hasegawa, M., Takata, M., Matsumura, J. & Oda, K. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood. *Ultrasonics* **51**, 296–302 (2011).
64. Lachenbruch, B., Johnson, G. R., Downes, G. M. & Evans, R. Relationships of density, microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* **40**, 55–64 (2010).
65. Krauss, A. & Kúdela, J. Ultrasonic wave propagation and Young's modulus of elasticity along the grain of Scots pine wood (*Pinus sylvestris* l.) varying with distance from the pith. *Wood Res.* **56**, 479–488 (2011).
66. Lindström, H., Harris, P., Sorensson, C. T. & Evans, R. Stiffness and wood variation of 3-year old *Pinus radiata* clones. *Wood Sci. Technol.* **38**, 579–597 (2004).

67. Raczkowski, J., Helinska-Raczkowska, L. & Molinski, W. Relationship between lengthwise ultrasound transmission and tracheid length in wood of selected softwood species. *Folia For. Pol. Ser. B - Drzew.* **35**, 3–12 (2004).
68. Downes, G. M. *et al.* Relationship between wood density, microfibril angle and stiffness in thinned and fertilized *Pinus radiata*. *IAWA J.* **23**, 253–265 (2002).
69. Feeney, B., Chivers, R. & Barnard, G. Meso-Structural Considerations of Ultrasonic Propagation in Wood. *Mol. Quantum Acoust.* **22**, 57–68 (2001).
70. Watt, M. S. *et al.* Modelling the influence of environment and stand characteristics on basic density and modulus of elasticity for young *Pinus radiata* and *Cupressus lusitanica*. *For. Ecol. Manage.* **255**, 1023–1033 (2008).
71. Vikram, V. *et al.* Stiffness of douglas-fir lumber: Effects of wood properties and genetics. *Can. J. For. Res.* **41**, 1160–1173 (2011).
72. Calegari, L., Gatto, D. A. & Stangerlin, D. M. Influence of Moisture Content, Specific Gravity and Specimen Geometry on the Ultrasonic Pulse Velocity in *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden Wood. *Rev. Ciência da Madeira - RCM* **2**, 64–74 (2011).
73. Mason, E. Designing silvicultural regimes with a structural log index. *New Zeal. J. For.* **57**, 13–18 (2012).
74. Ribeiro, P. G., Gonçalves, J. C., Gonçalves, R., Faustino Teles, R. & de Souza, F. Ultrasound waves for assessing the technological properties of *pinus caribaea* var *hondurensis* and *eucalyptus grandis* wood. *Maderas Cienc. y Tecnol.* **15**, 195–204 (2013).
75. Bucur, V. & Feeney, F. Attenuation of ultrasound in solid wood. *Ultrasonics* **30**, 76–81 (1992).
76. GERHARDS, C. C. EFFECT OF KNOTS ON STRESS WAVES IN LUMBER. *USDA SERV RES PAP FPL 384* 28 (1982).
77. Sakai, H., Minamisawa, A. & Takagi, K. Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods. *Ultrasonics* **28**, 382–385 (1990).
78. Sobue, N. Simulation Study on Stress Wave Velocity in Wood above Fiber Saturation Point. *Mokuzai Gakkaishi* **39**, 271–276 (1993).
79. Sandoz, J. L. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Sci. Technol.* **27**, 373–380 (1993).
80. Wang, S. Y., Chiu, C. M. & Lin, C. J. Variations in ultrasonic wave velocity and dynamic Young's modulus with moisture content for *Taiwania* plantation lumber. *Wood Fiber Sci.* **34**, 370–381 (2002).
81. Wang, S. Y., Lin, C. J. & Chiu, C. M. The adjusted dynamic modulus of

- elasticity above the fiber saturation point in Taiwania plantation wood by ultrasonic-wave measurement. *Holzforschung* **57**, 547–552 (2003).
82. De Oliveira, F. G. R., Candian, M., Lucchette, F. F., Salgon, J. L. & Sales, A. Moisture content effect on ultrasonic velocity in Goupia Glabra. *Mater. Res.* **8**, 11–14 (2005).
 83. Chan, J. M. & Moreno Chan, J. Moisture content in radiata pine wood: Implications for wood quality and water-stress response. *Education* **203** (2007).
 84. Wang, X. Effects of size and moisture on stress wave E-rating of structural lumber. in *10th World Conference on Timber Engineering 2008* vol. 3 1469–1476 (2008).
 85. Gao, S., Wang, X., Wang, L. & Allison, R. B. Modeling Temperature and Moisture State Effects on Acoustic Velocity in Wood. in *Proc. 17th International Symposium on Nondestructive Testing and Evaluation of Wood* 411–418 (2011).
 86. Unterwieser, H. & Schickhofer, G. Influence of moisture content of wood on sound velocity and dynamic MOE of natural frequency- and ultrasonic runtime measurement. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **69**, 171–181 (2011).
 87. Senalik, A. Detection and assessment of wood decay - glulam beams and wooden utility poles. (University of Illinois at Urbana, 2013).
 88. Bächle, H. & Walker, J. The influence of temperature on the velocity of sound in green pine wood. *Holz als Roh - und Werkst.* **64**, 429–430 (2006).
 89. Xu, H. D. Research on stress wave propagation velocity in both frozen and unfrozen wood.
 90. Gao, S., Wang, X., Wang, L. & Allison, R. B. Effect of temperature on acoustic evaluation of standing trees and logs: PART 2: Field investigation. *Wood Fiber Sci.* **45**, 15–25 (2013).
 91. Bucur, V. *et al.* A preliminary explanation for subzero temperature effect on stress wave velocity in green Korean pine wood. *Wood Fiber Sci* **4**, 567–573.
 92. Xu, H. & Wang, L. Analysis of cold temperature effect on stress wave velocity in green wood. *Holzforschung* **68**, 693–698 (2014).
 93. Gao, S., Wang, L. & Wang, Y. A comparative study on the velocities of stress wave propagation in standing Fraxinus mandshurica trees in frozen and non-frozen states. *Front. For. China* **4**, 382–387 (2009).
 94. Guillaume, C., Katline, C. V., Benoit, L., Thierry, A. & Stefan, M. Changes in ultrasound velocity and attenuation indicate freezing of xylem sap. *Agric. For. Meteorol.* **185**, 20–25 (2014).

95. Grabianowski, M., Manley, B. & Walker, J. C. F. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber. *Wood Sci. Technol.* **40**, 205–216 (2006).
96. Toulmin, M. J. & Raymond, C. A. Developing a sampling strategy for measuring acoustic velocity in standing *Pinus radiata* using the treetap time of flight tool. *New Zeal. J. For. Sci.* **37**, 96–111 (2007).
97. Mahon, J. M., Jordan, L., Schimleck, L. R., Clark, A. & Daniels, R. F. A comparison of sampling methods for a standing tree acoustic device. in *Southern Journal of Applied Forestry* vol. 33 62–68 (2009).
98. Auty, D. & Achim, A. The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands. *Forestry* **81**, 475–487 (2008).
99. Gonçalves, R., Pedroso, C. B. & Massak, M. V. Acoustic and bending properties in *Pinus elliottii* beams obtained from trees of different ages. *J. Wood Sci.* **59**, 127–132 (2013).
100. Lasserre, J. P., Mason, E. & Watt, M. The influence of initial stocking on corewood stiffness in a clonal experiment of 11-year-old *Pinus radiata* D. Don. *New Zeal. J. For.* **49**, 18–23 (2004).
101. Lasserre, J. P., Mason, E. G., Watt, M. S. & Moore, J. R. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. *For. Ecol. Manage.* **258**, 1924–1931 (2009).
102. Grabianowski, M., Manley, B. & Walker, J. Impact of stocking and exposure on outerwood acoustic properties of *Pinus radiata* in Eyrewell forest. *New Zeal. J. For.* **49**, 13–17 (2004).
103. Johnson, G. R. & Gartner, B. L. Genetic variation in basic density and modulus of elasticity of coastal Douglas-fir. *Tree Genet. Genomes* **3**, 25–33 (2006).
104. Lasserre, J. P., Mason, E. G. & Watt, M. S. Influence of the main and interactive effects of site, stand stocking and clone on *Pinus radiata* D. Don corewood modulus of elasticity. *For. Ecol. Manage.* **255**, 3455–3459 (2008).
105. Searles, G. & Moore, J. Measurement of Wood Stiffness in Standing Trees and Logs: Implications for End-Product Quality. *COST E53 – Bled* **21**, 1–5 (2009).
106. Lowell, E. C., Todoroki, C. L., Dykstra, D. P. & Briggs, D. G. Linking acoustic velocity of standing Douglas-fir trees to veneer stiffness: A tree-log-product study across thinning treatments. *New Zeal. J. For. Sci.* **44**, 1–16 (2014).

107. Roth, B. E., Li, X., Huber, D. A. & Peter, G. F. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA. *For. Ecol. Manage.* **246**, 155–162 (2007).
108. Warren, E., Smith, R. G. B., Apiolaza, L. A. & Walker, J. C. F. Effect of stocking on juvenile wood stiffness for three Eucalyptus species. *New For.* **37**, 241–250 (2009).
109. Waghorn, M. J. & Watt, M. S. Stand variation in *Pinus radiata* and its relationship with allometric scaling and critical buckling height. *Ann. Bot.* **111**, 675–680 (2013).
110. Cown, D. J. & McConchie, D. L. Wood property variations in an old-crop stand of radiata pine. *New Zeal. J. For. Sci.* **10**, 508–520 (1980).