

Influencia de distintos tipos de uniones y espesores en la resistencia mecánica en elementos estructurales para madera *Cordia alliodora*

Jose Cascante¹, Fatima Saborío¹, Karen Acuña¹

jose.cascantesolis@ucr.ac.cr , fatima.saborio@ucr.ac.cr, karen.acunapoveda@ucr.ac.cr

RESUMEN

La presente investigación aborda la importancia de conocer la mejor unión entre piezas de madera (*Cordia alliodora*) para obtener la mayor resistencia a deformaciones bajo carga. Se llevó a cabo un experimento en la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica, donde se realizaron pruebas de flexión sobre las piezas, enfocándose en diferentes tipos de uniones (transversal con adhesivo, ensamble de horquilla con adhesivo y sin unión) y dimensiones. El objetivo de la investigación era probar la hipótesis de que entre mayor sea el ancho de cada pieza de madera mayor será su módulo de elasticidad, además, si las piezas con uniones en comparación a la pieza sin ningún tipo de unión presentan una mayor resistencia mecánica. Lo anterior con la finalidad de evaluar si el tipo de unión, la dimensión o la combinación de ambos factores producen algún efecto en el módulo de elasticidad.

A partir de los datos recolectados se puede asumir que el tipo de unión produce un efecto independiente de la dimensión sobre el módulo de elasticidad; se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos destacando que sin unión es mejor que la horquilla y que la unión transversal es mejor que la horquilla ambas mayores a los 500 megapascuales de módulo de ruptura. Es importante destacar que los resultados obtenidos en este estudio se basan en la madera de laurel (*Cordia alliodora*) específicamente y en las condiciones experimentales mencionadas, por lo cual otros factores, podrían influir en los resultados. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios adicionales para confirmar estos hallazgos.

PALABRAS CLAVES: Módulo de elasticidad, residuales, potencia, comparaciones múltiples de Tukey, efectos.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica uno de los materiales de mayor uso en el sector de construcción es la madera, de acuerdo con Oficina Nacional Forestal (2022) un 27.6% de madera procesada en Costa Rica se destina a este sector, del cual, un 8.4% es empleada a uso estructural como vigas, columnas, soportes, entre otros. En ciertas ocasiones las piezas requeridas poseen dimensiones mayores a las comercializadas, originando la problemática necesidad de utilizar métodos para su adaptación, como la realización de uniones de piezas de madera de menores dimensiones para obtener el tamaño requerido. No obstante, se debe tener en cuenta que estas uniones deben ser aceptables para darles un uso estructural, mostrando excelentes prestaciones mecánicas que logren resistir las cargas a las cuales serán expuestas (Özçiğci, Yapici, 2008). Por este motivo se desea comparar de qué manera el tipo de unión produce un mayor módulo de elasticidad (resistencia de deformaciones bajo carga), según distintos tipos

¹ Estudiantes de bachillerato en estadística de la Universidad de Costa Rica

de espesores, con la finalidad de brindar recomendaciones del tipo de unión y el espesor que generan una mayor resistencia en flexión.

Según investigaciones sobre tipos de uniones longitudinales en elementos estructurales mediante la utilización de vigas a escala que fueron sometidas a pruebas de flexión, las uniones longitudinales podían transmitir pequeños momentos de fricción. Además, obtuvieron como resultado que las vigas con uniones fueron más resistentes en comparación con las vigas continuas (sin uniones), resaltando la importancia de las uniones en la transferencia de carga entre los elementos estructurales, y en consecuencias se obtienen estructuras que resisten durante un mayor periodo de tiempo (Karolak y Jasieńko, 2024).

Además, la madera como material de construcción posee propiedades ventajosas en muchos ámbitos, por ejemplo, a nivel social y ambiental. Respecto al social, específicamente en la economía, el sector de la madera y las empresas que la manejan movilizan la economía, principalmente en las zonas rurales, generando empleos y riquezas (ADEMAN, s.f). Asimismo, en el ámbito ambiental, los árboles, haciendo uso de la fotosíntesis, tienen la capacidad de absorber el CO₂ presente en el aire (Europanel, 2018) esto señala como la madera al provenir de los árboles alivia la atmósfera del dióxido de carbono, el cual es un compuesto químico que agrava el cambio climático, además, el proceso para **transformar la madera de producto primario a final es óptimo en comparación a otros materiales** como lo son el acero, el aluminio, el hormigón o los plásticos (AEIM, 2016) con respecto a la energía necesaria para llevar a cabo la producción de los mismos, por lo que la madera funciona como un importante sustituto en ese caso. Además, de acuerdo con Coto (2015) la madera se puede caracterizar por presentar distintas propiedades para cada uso específico y características deseables, para el área de construcción, se pueden destacar propiedades mecánicas; como la resistencia de la madera ante una carga perpendicular, carga puntual, fuerzas de deslizamiento presente en las zonas de apoyo de las vigas y dureza; a su vez propiedades eléctricas como un excelente aislante eléctrico y acústico.

Respecto a la especie *Cordia alliodora*, perteneciente a la familia Boraginaceae, es una especie muy reconocida en Centroamérica gracias a su fácil reproducción y su destacado uso para la construcción de muebles, durmientes de ferrocarril, puentes, cubiertas de barcos, construcción de interiores y exteriores (marcos, puertas y ventanas), contrachapados; debido a ser suave y fácil de trabajar, popular belleza y resistencia ante el ataque de termitas (Ecos del Bosque, s.f; Sanchez, 2012). En Costa Rica se puede encontrar con mayor frecuencia en zonas con elevaciones bajas (0-1200 msnm), tanto en climas secos como muy húmedos; debido a su facilidad de reproducción por la dispersión de sus frutos por el aire en la época de seca y por agua en la época lluviosa (Hernández, 2019; Ecos del Bosque, s.f).

La madera de la especie *Cordia alliodora* presenta el duramen y la albura bien diferenciados, con coloración marrón amarillento ligero para el duramen y un color amarillo pálido para la albura, la madera presenta bien marcado los anillos de crecimientos los cuales son más notorios en árboles que están en zonas con estaciones secas bien definidas, la presencia de estos anillos produce que según el corte realizado a la madera se presenten betas especialmente en cortes tangenciales (Moya et al. 2014; Briceño et al. 2016). Respecto a las propiedades físicas las cuales están relacionadas a la edad, la ubicación de la pieza de la madera en el árbol, el manejo silvicultural y al contenido de humedad presente en la madera (Moya et al. 2014), la madera secada al aire presenta una densidad de 0.52 g/cm³, considerándose una madera de peso moderado, además referente a las propiedades

mecánicas, la madera posee una resistencia a flexión estática de módulo de elasticidad con un contenido de humedad de 12% (madera secada al aire) 8878.70 Megapascuales y con un contenido de humedad superior al 30% (madera verde) de 7366.56 Megapascuales (Rojas, 2003; Moya et al. 2014).

Siendo la especie *Cordia alliodora* una de las más utilizadas para construcción y mueblería en el país (Barrantes y Ugalde, 2016), y dado la problemática mencionada, se plantea como objetivo evaluar el efecto del tipo de unión para madera de *Cordia alliodora* en resistencia mecánica de módulo de elasticidad, con pruebas de flexión, para distintas dimensiones del ancho. De forma más específica, se desea analizar si alguno de los tipos de uniones tiene más impacto en el módulo de elasticidad para madera de *Cordia alliodora*.

Asimismo, los objetivos anteriormente mencionados permiten la estructuración del experimento, por lo cual, se establece la hipótesis de que entre mayor sea el ancho de cada pieza de madera mayor será su módulo de elasticidad, además de que la resistencia mecánica será mayor en las piezas con uniones en comparación a la pieza sin ningún tipo de unión como los resultados obtenidos por Karolak y Jasieńko (2024).

METODOLOGÍA

El estudio se realizó el día 19 de mayo del 2024 en la Escuela de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Costa Rica, ubicada en la provincia de Cartago en Costa Rica, en el laboratorio de propiedades físicas, químicas y mecánicas de la madera.

Para este experimento se tomó en cuenta como variable respuesta el módulo de elasticidad. Además, para la determinación del módulo de elasticidad se realizaron pruebas de flexión, mediante la máquina de ensayo Universal Tinus Olsen Horizon H10KT, la cual posee un software que genera los datos de módulo de elasticidad con la siguiente fórmula (Cervantes, 2017):

$$MOE = \frac{Plp * L^3}{4 * b * d^3 * Ylp} * 0.980665$$

Donde:

MOE: módulo de elasticidad (Megapascuales)

Plp: carga en el límite proporcional (Kilogramos)

L: luz entre apoyos (centímetros)

b: ancho (centímetros)

d: espesor (centímetros)

Ylp: deformación al eje neutro (milímetros)

Con el fin de evaluar si el tipo de unión afecta el módulo de elasticidad de forma diferente en cada dimensión el experimento consideró en 2 factores; el primero corresponde a tipos de uniones de 3 niveles (unión transversal con adhesivo, ensamble de horquilla con adhesivo y testigo) el cual se destinó como factor de diseño, por su parte, el segundo factor corresponde a las dimensiones de la pieza seleccionando 3 niveles (2.5 cm por 2.5 cm, 2.5 cm por 5 cm y 2.5 cm por 7 cm); se seleccionó una cantidad de 18 piezas de cada dimensión y a cada una de estas se le asignó aleatoriamente un tipo de unión, por lo que se contó con 6 piezas por tratamiento.

Tomando en cuenta los factores mencionados, se tienen los siguientes 9 tratamientos:

Cuadro 1.

Combinaciones de los niveles de los factores tipo de unión y dimensión.

Unión	Dimensión
Transversal	2.5x2.5cm
Transversal	2.5x5cm
Transversal	2.5x7cm
Horquilla	2.5x2.5cm
Horquilla	2.5x5cm
Horquilla	2.5x7cm
Sin ningún tipo de unión	2.5x2.5cm
Sin ningún tipo de unión	2.5x5cm
Sin ningún tipo de unión	2.5x7cm

Una vez finalizada la recolección de los datos necesarios para iniciar el análisis de los mismos se arrancó con un estudio de las diferentes medidas que ayudan a su observación como lo son: la media general de la respuesta y la media de cada factor, los efectos simples de cada factor, las medias observadas de cada tratamiento, las varianzas de cada tratamiento, verificar el supuesto de homocedasticidad utilizando la prueba formal de Barlett y de normalidad usando la prueba formal de Kolmogorov-Smirnov, y por último, la estimación de la varianza del error.

Por otro lado, después de finalizar el análisis inicial de los datos se procedió a realizar una visualización con diferentes gráficos, como lo son: un gráfico de analizar los residuales del modelo en orden temporal de medición para detectar tendencias, gráficos para analizar los supuestos de normalidad y homocedasticidad , un gráfico de los valores del módulo de elasticidad separados por dimensiones para identificar si existe una interacción entre el tipo de unión y las dimensiones de las piezas de madera, un gráfico de cajas para respaldar lo anterior, gráficos para analizar los supuestos de normalidad y homocedasticidad luego de eliminar la interacción.

Asimismo, se inició definiendo un modelo con interacción utilizando el modelo de suma nula, esto implicó evaluar si existe interacción entre el tipo de unión y las dimensiones de las piezas de madera, para esto se asignó el siguiente modelo:

$$E[Trat] = \mu + \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \beta_1 D_1 + \beta_2 D_2 + (\alpha\beta)_{11} U_1 D_1 + (\alpha\beta)_{12} U_1 D_2 + (\alpha\beta)_{21} U_2 D_1 + (\alpha\beta)_{22} U_2 D_2$$

Sabiendo que:

U_1 =Ensamble de horquilla con adhesivo

U_2 =Sin ningún tipo de unión

D_1 =2.5x2.5 cm

D_2 =2.5x5 cm

Para esto, se realizaron los gráficos necesarios, una prueba de hipótesis, usando como hipótesis nula de que el efecto de interacción es igual a 0, en otras palabras, que el efecto del tipo de unión de las piezas de madera sobre el módulo de elasticidad promedio es independiente de la dimensión, sería lo mismo para las 3 dimensiones. Esta prueba de hipótesis se realizó con un análisis de varianza (ANOVA).

Dado que no se rechaza la hipótesis nula se procede a utilizar un modelo sin interacción, asimismo, se calcularon los promedios estimados bajo este modelo y se compararon con los promedios observados, el modelo se define de la siguiente manera:

$$E[Trat] = \mu + \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \beta_1 D_1 + \beta_2 D_2$$

Por consiguiente, una vez elegido el modelo sin interacción se realizó el análisis pertinente, así como un análisis de igualdad de medias para los distintos tipos de uniones mediante un análisis de varianza (ANOVA). Además, se realizó un análisis de diferencias entre los promedios de los tipos de unión, ya que se quería verificar existe un efecto del tipo de unión sobre el módulo de elasticidad promedio sin tomar en cuenta la dimensión, mediante comparaciones múltiples de Tukey con el fin de encontrar cuál tipo de unión tiene un mayor módulo de elasticidad. Al encontrar diferencias significativas se procedió con un estudio de diferencias relevantes, el cual consiste en encontrar las cotas inferiores para visualizar la magnitud de cada diferencia que se considera significativa y compararlas con la diferencia relevante establecida.

Por otro lado, se realizó un análisis de la potencia, esto por fines académicos, con el objetivo de encontrar la probabilidad de encontrar diferencias relevantes cuando realmente existen, es importante mencionar que para una prueba de hipótesis se pueden cometer 2 tipos de errores. Según Montgomery (2019), el primero corresponde al error tipo I, este se define como tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera, el segundo es el error tipo II, este se da cuando se toma la decisión de no rechazar la hipótesis alternativa es verdadera.

La potencia se define como la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es falsa, lo que es igual a, la probabilidad de encontrar diferencias relevantes cuando realmente existen. Según Lapeña (2011), el análisis de la potencia corresponde a estimar la probabilidad de cometer error tipo II, se desea que este sea pequeño con el fin de que el complemento, que corresponde a la potencia, sea lo más alto posible. Además, la potencia depende de la cantidad de réplicas por tratamiento que se realicen, la variabilidad por tratamiento que corresponde a la variabilidad del error y de la diferencia relevante que se establezca.

Para el análisis de la investigación; gráficos y diferentes pruebas se utilizó el lenguaje de R con la versión 4.2.2 (R Core Team, 2022), utilizando como principales paquetes; *car* (Fox, Weisberg, 2019), *ggplot2* (Wickham, 2016), *pwr* (Champely S, 2020) y *readxl* (Wickham, 2023), además, la significancia utilizada fue de 0.05.

Como experto y colaborador de la investigación se contó con el Dr. Ingeniero Forestal Roger Moya Roque, docente, extensionista, investigador y coordinador de maestría de la Escuela de Ingeniería Forestal, del Instituto de Costa Rica. Cabe destacar, que se considera como valor relevante una diferencia de 500 megapascales de módulo de elasticidad.

RESULTADOS

Primeramente, se procedió a realizar un análisis exploratorio donde se buscaba conocer, a partir de visualizaciones, el comportamiento de los datos recolectados. Por lo tanto, se obtuvo que la media general del módulo de elasticidad corresponde a 2947.373, además, se

presenta un resumen de los estadísticos descriptivos de cada tratamiento según el módulo de elasticidad.

Cuadro 2.

Estadísticos descriptivos de cada tratamiento según módulo de elasticidad (Megapascals)

Unión	Dimensión	Media	Desviación estándar	Mínimos	Máximos
Horquilla	2.5x2.5	2012.819	1063.577	505.784	3182.540
	2.5x5	2417.082	503.579	1400.666	2738.953
	2.5x7	1857.151	337.346	1448.545	2409.976
Sin unión	2.5x2.5	3822.524	950.416	2152.447	4883.236
	2.5x5	3184.723	580.862	2735.094	4260.342
	2.5x7	2800.301	262.680	2408.878	3170.857
Transversal	2.5x2.5	3786.252	612.460	3219.500	4886.102
	2.5x5	3313.203	595.749	2843.205	4194.067
	2.5x7	3332.302	1018.907	2655.934	5362.177

Con base en la dispersión de los datos, el cuadro 2 refleja que el tratamiento de horquilla en la dimensión 2.5 cm por 2.5 cm es el que posee una mayor dispersión de los datos del módulo de elasticidad. Además, se observa que dentro de los rangos; es el tratamiento que presenta un mayor rango y esto se evidencia al tener una desviación estándar alta, mientras que el tratamiento sin unión con la dimensión 2.5 cm por 7 cm es la que genera el menor rango de sus datos.

Asimismo, se destaca que la media del tratamiento sin unión con la dimensión 2.5 cm por 2.5 cm es la más alta entre los demás tratamientos observados. De igual forma, el tratamiento que presenta menor dispersión del módulo de elasticidad es sin unión con la dimensión 2.5 cm por 7 cm.

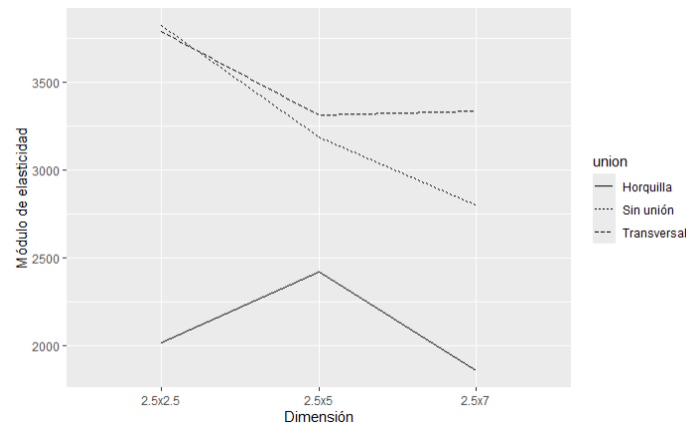
Por consiguiente, es importante realizar un estudio visual del comportamiento de los promedios de los tratamientos.

Al analizar la figura 3 (ver Anexo), se logra detectar que para la dimensión 2.5 cm por 2.5 cm para sin unión genera un promedio más alto que los otros tipos de unión, lo cual respalda lo visto anteriormente en el cuadro 2, además, el promedio de sin unión y transversal se notan bastante similares; En cambio, para la dimensión 2.5 cm por 5 cm el tipo de unión transversal y sin unión producen promedios muy similares aunque el promedio de transversal es un poco más alto, además, en la dimensión 2.5 cm por 7 cm se observa algo similar a lo anterior. Por lo anterior, se espera que exista interacción entre el tipo de unión y la dimensión.

Por otro lado, se aprecia que para la dimensión 2.5 cm por 2.5 cm, el tipo de unión con una mayor variabilidad es la de horquilla, mientras que para este mismo tipo de unión en la dimensión 2.5 cm por 5 cm se muestra la variabilidad más pequeña. Estas diferencias en la variabilidad es un indicio de que es posible que las distribuciones de todos los tratamientos propuestos no tengan la misma variabilidad condicional a la respuesta, es decir, que no se cumpla la homocedasticidad.

Figura 1.

Promedio de Módulo de Elasticidad para combinaciones de tipo de unión y dimensión.

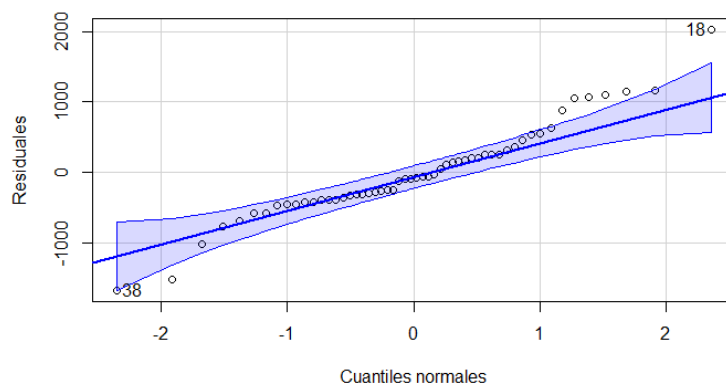


Se observa, en la figura 1 que la distancia entre las medias de módulo de elasticidad cuando se tiene un tipo de unión horquilla con respecto a unión transversal para la dimensión 2.5 cm por 2.5 cm es mucho mayor respecto a la distancia entre las media de unión horquilla y transversal en la dimensión 2.5 cm por 5 cm, similar ocurre con la unión de horquilla con respecto a sin unión donde la distancia de la media en la dimensión 2.5 cm por 2.5 cm es mayor a la distancia de medias en la dimensión 2.5 cm por 5 cm. Esto es otro fuerte indicador de que existe interacción entre tipo de unión y dimensión.

Con respecto a la verificación de los supuestos, se realizó un gráfico de los residuales contra los cuantiles teóricos para visualizar si a partir del modelo, la distribución condicional de la variable respuesta, que en este caso corresponde al módulo de elasticidad dado los factores es normal, este gráfico se llevó a cabo con los residuales del modelo.

Figura 2.

Distribución de los residuales del modelo general contra los cuantiles teóricos.



Lo que se busca en la Figura 2 es que los residuales estén en su mayoría dentro de las bandas de confianza, lo cual en este caso se satisface, se puede suponer que el modelo cumple el supuesto de normalidad. Además, mediante una prueba formal de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significancia de 0.05 se obtuvo como resultado una probabilidad asociada de 0.525, por lo que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que existe normalidad en los residuales, y se confirma que se cumple el supuesto de normalidad.

Posteriormente, para verificar si el modelo posee homocedasticidad se realizó primero una comprobación visual de los residuales del modelo general contra los valores ajustados para así poder detectar algún patrón que indique que las varianzas no son constantes.

Observando la Figura 4 (ver Anexo) se aprecia como los residuales parecen seguir un comportamiento aleatorio sin presentar ningún patrón que indique que las varianzas son constantes. Al realizar la prueba formal de Bartlett con un nivel de significancia de 0.05, bajo la hipótesis nula de que la varianza condicional de la respuesta es la misma para cada factor, se obtiene una probabilidad asociada de 0.063, por lo que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, por lo cual se asume que hay homocedasticidad, es decir, que las varianzas de cada distribución de la variable respuesta dado los tratamientos son constantes.

Además, es importante el análisis de existencia de independencia entre los factores seleccionados, para esto, se debe mencionar que al suponer independencia se obtiene gran variedad de opciones de comprender la incidencia de los factores con respecto a la variable respuesta.

Por otro lado, en la Figura 5 (ver Anexo) se analizó el comportamiento de los residuales según el orden temporal de la obtención de la medición del módulo de elasticidad, con esta figura se puede analizar si se tiene algún efecto de aprendizaje o fatiga en el módulo de elasticidad al momento de realizar las mediciones, en este caso se aprecia como los residuales no tienen un patrón claro de aprendizaje por lo que los residuales no se vieron afectados por el orden de medición.

Luego de poder confirmar los supuestos, se procedió a realizar una prueba formal para analizar la interacción entre tipo de unión y la dimensión, mediante un análisis de varianza, con un nivel de significancia de 0.05, bajo la hipótesis nula de que el efecto del tipo de unión sobre el módulo de elasticidad es independiente de la dimensión. Mediante el análisis de varianza de la interacción, se determinó que no hubo diferencias significativas, ya que, el valor obtenido de la prueba Fisher fue de 0.336 mayor al nivel de significancia de 0.05, por lo que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que el efecto del tipo de unión sobre el módulo de elasticidad es independiente de la dimensión, por lo que se procedió a realizar el análisis con un modelo sin interacción.

Es importante mencionar que a pesar de que en las figuras 1 y 3 parecía que existía interacción principalmente en el caso de la diferencia de medias de unión de horquilla con respecto a la unión transversal en las dimensiones de 2.5 cm por 2.5 cm y en las de 2.5 cm por 5 cm, realmente no existía, ya que, el efecto del tipo de unión sobre el módulo de elasticidad es independiente de la dimensión, es decir, es el módulo de elasticidad es el mismo en cualquier dimensión.

Se realiza nuevamente la prueba de supuestos para un modelo sin interacción, en la Figura 6 (ver anexo) se puede apreciar como los residuales se encuentran dentro de las bandas de confianza, lo que indica que se cumple con el supuesto de normalidad, lo cual se confirma con la prueba formal de Kolmogorov-Smirnov con un nivel de significancia de 0.05 se obtuvo como resultado una probabilidad asociada de 0.653, por lo que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que existe normalidad en los residuales.

Mientras que la homocedasticidad en la Figura 7 (ver anexo) parecen seguir un comportamiento aleatorio sin presentar ningún patrón que indique que las varianzas son constantes, confirmándose la homocedasticidad con la prueba formal de Bartlett con un nivel

de significancia de 0.05, bajo la hipótesis nula de que la varianza condicional de la respuesta es la misma para cada tratamiento, se obtiene una probabilidad asociada de 0.063, por lo que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, por lo cual se asume que hay homocedasticidad, es decir, que las varianzas de cada distribución de la variable respuesta dado los tratamientos son constantes.

Dado que no existe interacción se procedió a analizar un nuevo modelo sin interacción el cual corresponde a

$$E[Trat] = \mu + \alpha_1 U_1 + \alpha_2 U_2 + \beta_1 D_1 + \beta_2 D_2$$

Con respecto a este modelo se obtuvo que los efectos y las medias correspondientes a cada tipo de unión

A partir de lo anterior, se realizó un análisis de diferencias de promedios entre los distintos tipos de unión, dado que interesa estudiar si existe un efecto del tipo de unión sobre el módulo de elasticidad promedio sin tomar en cuenta la dimensión y así, concluir cuál tipo de unión tiene un mayor módulo de elasticidad. En el cuadro 3 (Ver anexo) es posible visualizar que el tipo de unión con la media más alta es la de transversal, además, el promedio de este tiene una distancia por encima de la media general del módulo de elasticidad, ya que posee un efecto positivo, lo mismo para sin unión. Asimismo, el tipo de unión de horquilla tiene la media más baja y posee una distancia por debajo de la media general del módulo de elasticidad, ya que posee un efecto negativo.

Para esto, se le analizó la igualdad de medias de las distintas uniones, obteniendo con una significancia de 0.05 que sí existen diferencias significativas en las medias de los distintos tipos de uniones ($p < 0.001$). Dado que las medias presentaron diferencias, se analizó la independencia de hipótesis de las diferencias de medias de cada tipo de unión, dando como resultado que las diferencias de medias no son independientes, por lo que se procedió a realizar comparaciones dentro de cada tipo de unión usando corrección de Tukey, obteniendo con un nivel de significancia de 0.05, que los tratamientos con diferencias significativas fueron sin unión y tipo de unión de horquilla con una probabilidad asociada de ($p < 0.001$), además, de transversal y horquilla con una probabilidad asociada de ($p < 0.001$), por otra parte, para la comparación del tipo de unión transversal y sin unión no se encontraron diferencias significativas, ya que, la probabilidad asociada fue de 0.66 (mayor al valor de significancia de 0.05).

Dado que únicamente se encontraron diferencias significativas entre los promedios de sin unión y tipo de unión de horquilla, y en unión transversal y de horquilla, a estas diferencias se les calculó las cotas inferiores con ajuste de Bonferroni, por lo que se obtuvo con un nivel de confianza de 95% que la cota inferior de la diferencia de medias para sin unión y tipo de unión de horquilla fue de 692.972 megapascuales, lo que indica que al no utilizar unión el módulo de elasticidad es al menos 692.972 kilopascuales mayor que el tipo de unión de horquilla, indicando que sin unión es mejor que la unión de horquilla; Respecto a la unión transversal y de horquilla la cota inferior fue de 901.042 megapascuales, indicando que el tratamiento de unión transversal el módulo de elasticidad es al menos de 901.042 megapascuales mayor que la unión de horquilla, por lo que la unión transversal es mejor que la unión de horquilla, finalmente para la unión transversal y sin unión no se encontraron diferencias significativas en las medias, por lo que no se realizó una cota inferior. Esto ocurre en las tres dimensiones utilizadas por el hecho de que no hay interacción entre el tipo de unión y la dimensión.

Cabe descartar que ambas cotas inferiores son superiores a la diferencia relevante de al menos 500 megapascuales de módulo de elasticidad, por lo que se considera que las diferencias del módulo de elasticidad para sin unión y tipo de unión de horquilla son relevantes, igual para la unión transversal y de horquilla.

En cuanto al análisis de la potencia, a partir de la diferencia relevante que se estableció como 500 Megapascuales, se escogieron 3 medias teóricas, la primera y la tercera tienen una distancia entre ellas igual a la diferencia relevante, mientras tanto la segunda es el promedio de las otras 2, con lo anterior y con 18 repeticiones por unión se encuentra una potencia de 0.426, es decir, hay una probabilidad de 0.426 de llegar a la conclusión de que hay diferencias relevantes cuando en realidad las medias difieren al menos 500 Megapascuales.

Además, se evaluó cuál sería la cantidad de repeticiones necesarias para cumplir con una potencia de 0.80, esto porque según Cohen (1988), un nivel de significancia aceptable se ha establecido por convención en 0.80, a partir de lo esto se obtuvo que se necesitaría un total de 41 repeticiones en cada tratamiento para lograr alcanzar esta potencia.

CONCLUSIONES

Es importante mencionar que a pesar de que al graficar los promedios del módulo de elasticidad según tratamientos (figuras 1 y 3) parecía existir interacción, la cual realmente no existía, ya que, con el análisis de varianza se obtuvo que el efecto del tipo de unión sobre el módulo de elasticidad es independiente de la dimensión.

Las uniones que presentaron diferencias relevantes fueron, unión transversal con la unión horquilla (siendo mejor la unión transversal que la de horquilla), además, sin unión con el de unión de horquilla (siendo sin unión mejor que la unión de horquilla), este resultado difiere con el obtenido por Karolak y Jasieńko (2024), de que las piezas con uniones tenían mayor resistencia que las piezas sin ningún tipo de unión. Pero es importante mencionar que para la unión transversal y sin unión no se encontraron diferencias significativas, por lo que la resistencia elástica promedio de unión transversal es la misma que sin unión, por ende, es indiferente cuál de estas dos uniones utilizar.

Dado que las pruebas de flexión la resistencia de la unión de horquilla fue la que obtuvo menor módulo de elasticidad en comparación con la unión transversal y la sin unión, no se recomienda este tipo de unión en piezas de *Cordia alliodora* de uso estructural, pero en el caso de que se requieran piezas estructurales de largas dimensiones y se comercian piezas de madera de *Cordia alliodora* de menor dimensión a la requerida, se puede utilizar la unión transversal, ya que, esta unión resiste la misma elasticidad promedio que una pieza completa (sin unión) del largo requerido.

También, se debe resaltar que hay más variables que pueden influir en el módulo de elasticidad y pueden ser consideradas en próximos estudios para reducir variabilidad, una de estas es la densidad, ya que, como menciona Fernández (2018), el módulo de elasticidad aumenta conforme aumenta la densidad presente en la madera, por lo que esta variable se puede analizar como una covariable.

Por otro lado, la potencia encontrada es de 0.426, a pesar de que no sea una potencia alta se logra encontrar diferencias relevantes a partir de una diferencia de 500 Megapascuales, además, estableciendo una potencia de 0.80 se obtuvo que se necesitaban 41 repeticiones de cada tipo de unión, por lo cual es importante mencionar que los resultados obtenidos en el

estudio no se encontraron cercanos al límite de esta diferencia relevante. Por lo anterior, es fundamental trabajar con la persona experta con el fin de establecer una diferencia relevante que posea evidencias de que esta aumente la probabilidad de obtener diferencias relevantes cuando en realidad las hay.

BIBLIOGRAFÍA

- ADEMAN. (s.f.). *Ventajas de la madera*. ADEMAN.
<https://www.ademan.org/ventajas-de-la-madera/#:~:text=Reduce%20el%20nivel%20de%20estr%C3%A9s,de%20aislante%20t%C3%A9rmico%20y%20ac%C3%BAstico>.
- Barrantes, A. y Ugalde, S. (2016). *Usos y aportes de la madera en Costa Rica: Estadísticas 2015 [PDF]*. Oficina Nacional Forestal.
- Briceño, A., Orlando, J. Marys, S. (2016). Estudio de los anillos de crecimiento de *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken en Colombia. *Colombia Forestal*. 19(2) 95-107,
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=423946648007>
- Cervantes, M. (2017). *Efecto del proceso de secado al aire en la resistencia mecánica de las uniones junta de dedos no estructural, para madera de Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken [Tesis licenciatura, Tecnológico De Costa Rica] Repositorio TEC.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9396/efectos_proceso_secado_aire_resistencia_mecanica_union_junta_dedos_estructural_para_madera_cordia_alliodora_ruiz_oken.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Champely S (2020). *_pwr: Basic Functions for Power Analysis_*. R package version 1.3-0
<https://CRAN.R-project.org/package=pwr>.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates Inc
- Coto, A. (2015). *Manual de uso de la madera para la construcción*. Oficina Nacional Forestal (ONF)
https://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/manual_1.pdf
- Ecos del Bosque. (s. f.). *Cordia alliodora* <https://ecosdelbosque.com/plantas/cordia-alliodora>
- Europanel. (2018). *Frente al cambio climático: Utiliza madera*. [PDF]. Europanel.
- Fernández, F. (2018). *Propiedades organolépticas, físicas y mecánicas de la madera Cordia alliodora* (R. y P.) Oken de parcelas agroforestales en Jaén, Cajamarca [Tesis bachillerato, Universidad Nacional de Jaén].
<https://core.ac.uk/download/pdf/270318983.pdf>
- Fox J, Weisberg S (2019). *_An R Companion to Applied Regression_*, Third edition. Sage, Thousand Oaks CA.
<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>.
- Hernández, J. (2019, 9 septiembre). *Cordia alliodora* (Cordiaceae). Área de Conservación Guanacaste.
[https://www.acguanacaste.ac.cr/paginas-de-especies/plantas/637-cordiaceae/4196-i-cordia-alliodora-i-cordiaceae#:~:text=Cordia%20alliodora%20\(Cordiaceae\)%3A%20Arbol,en%20las%20construcciones%20de%20casas](https://www.acguanacaste.ac.cr/paginas-de-especies/plantas/637-cordiaceae/4196-i-cordia-alliodora-i-cordiaceae#:~:text=Cordia%20alliodora%20(Cordiaceae)%3A%20Arbol,en%20las%20construcciones%20de%20casas)
- Karolak, A., Jasieńko, J. (2024). Mechanical behaviour and failure modes of the selected carpentry joints in flexural elements. *Procedia Structural Integrity* 54 (1), 460-467,
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.107>
- Lapeña, B. P., Wijnberg, K. M., Stein, A., & Hulscher, S. J. (2011). Spatial factors affecting statistical power in testing marine fauna displacement. *Ecological Applications*, 21(7), 2756–2769. <https://doi.org/10.1890/10-1887.1>
- Montgomery, D. C. 2019. *Design and analysis of experiments* (8th ed.). John Wiley & Sons.

- Moya, R., Rodríguez, A., Olivares, C. (2014). *Árboles maderables de la Península de Osa*. Editorial Tecnológica.
- Oficina Nacional Forestal(ONF). (2022). *Usos y aportes de la madera en Costa Rica*. [PDF]. Oficina Nacional Forestal (ONF). https://onfcr.org/wp-content/uploads/ONF_Usos-y-Aportes-2021.pdf
- Özçifçi, A., Yapici, F. (2008). Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations. *Construction and Building Materials*. 22(7), 1543-1550, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.020>
- Rojas, A. (2003). Nogal Cafetero: Más que una Especie Ideal para Agroforestería. *El mueble y la madera*. 1(1). 9-16, <https://www.yumpu.com/es/document/read/24254066/nogal-cafetero-revista-el-mueble-y-la-madera>
- RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
- Sanchez,Y.(2012). *Elaboración de tablas de volúmenes y determinación de factores de forma de las especies forestales: chuncho (cedrelinga cateniformes), laurel (cordia alliodora), sangre de gallina (otoba sp.), ceibo (ceiba samauma) y canelo (nectandra sp.), en la provincia de Orellana*. [Tesis ingeniero Forestal, Politécnica de Chimbazo] <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/2213>
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.
- Wickham H, Bryan J (2023). `_readxl: Read Excel Files_`. R package version 1.4.3 <<https://CRAN.R-project.org/package=readxl>>.

ANEXOS

Cuadro 3.

Estadísticos descriptivos de cada tipo de unión según módulo de elasticidad (Megapascuales).

Factor	Niveles	Media	Efecto simple
Tipo de unión	Horquilla	2095.684	-851.700
	Sin unión	3269.183	321.800
	Transversal	3477.253	529.900

Figura 4.

Residuales del modelo general contra los valores ajustados del mismo modelo.

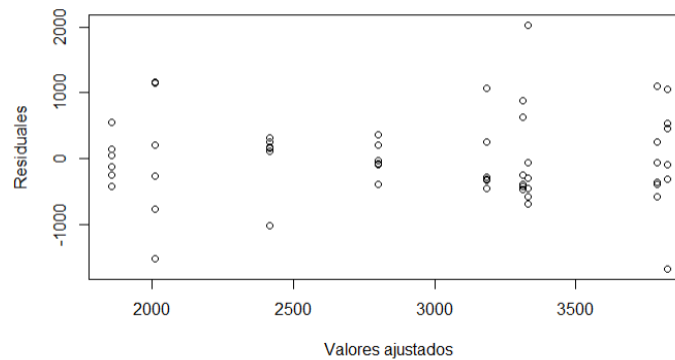


Figura 3.

Promedio de Módulo de Elasticidad según tratamientos

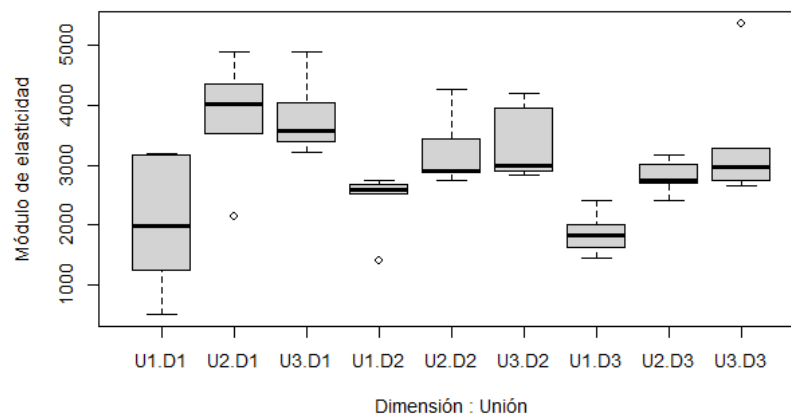


Figura 5.

Residuales del modelo general en orden temporal de medición del módulo de elasticidad para detectar tendencias.

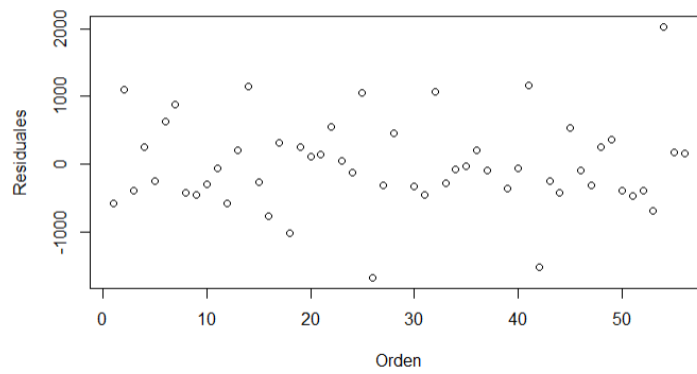


Figura 6.

Distribución de los residuales del modelo general contra los cuantiles teóricos.

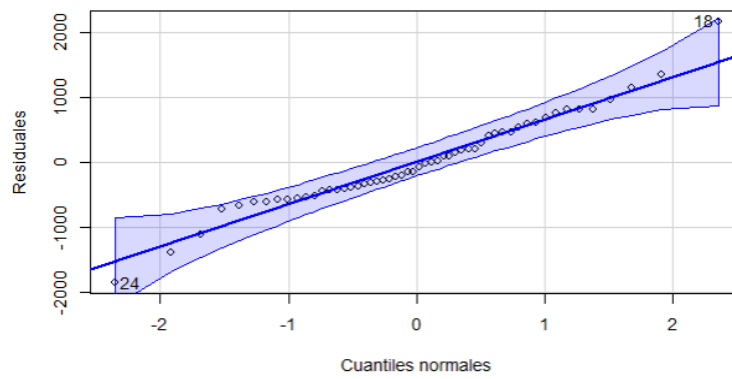


Figura 7.

Residuales del modelo general contra los valores ajustados del mismo modelo.

