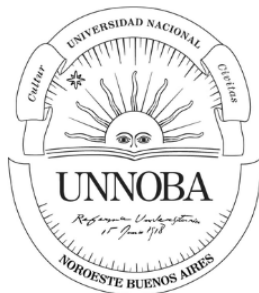


Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires



Escuela de Tecnología
Departamento de Ingeniería e Informática

Práctica Profesional Supervisada: *Análisis de los mecanismos resistentes de rotura a compresión en madera de álamo*

Alumno:
Enzo Agustín Leto

Docente Supervisor:
Ing. Patricio Germán Arrien

Tutor de la Empresa:
Mg. María José Castillo

Junín, 2025

1.Introducción	2
2.Objetivos	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3.Plan de trabajo y carga horaria.....	3
4.Descripción de la práctica profesional efectuada	4
4.1 La organización.....	4
4.2 Generalidades de la especie.....	7
4.3 Panorama general del <i>Populus Deltoides</i> en el mundo y en la Argentina.....	9
4.4 Foresto-Industria en Argentina.....	11
4.5 Práctica llevada a cabo	13
4.5.1 Muestreo.....	13
4.5.2 Dimensionamiento del material de ensayo.....	16
4.5.3 Lijado y Nomenclatura.....	16
4.5.4. Resistencia a la compresión	17
4.5.5. Densidad.....	18
4.5.6. Módulo de Elasticidad.....	19
4.5.7 Resultados y discusión	20
4.5.8 Análisis de la relación entre la esbeltez y la resistencia última.....	26
5. Conclusión.....	27
6. Bibliografía	28
7. Anexos.....	30
8.Agradecimientos	31

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más consciente de la sostenibilidad, el impacto ambiental y la crisis social, la madera se ha posicionado como un recurso invaluable. Su capacidad para ofrecer soluciones ecológicas y duraderas, sumada a su relevancia en diversas industrias, la convierte en un elemento clave en el desarrollo de viviendas sostenibles y en la economía global, especialmente en tiempos de incertidumbre. Además, la madera juega un papel esencial en la industria del papel y cartón.

En este contexto, esta Práctica Profesional Supervisada (PPS) se llevó a cabo en el área Maderas del Laboratorio de Ensayo de Materiales y Estructuras (LEMEJ), en el marco del proyecto de investigación titulado **Análisis de los mecanismos resistentes de rotura a compresión en madera de álamo** (*Populus Deltoides* "Stoneville 67") (Exp: 0587/22 SIB). El objetivo principal de esta PPS fue analizar el mecanismo de rotura y realizar una caracterización física y mecánica de la madera de álamo, con énfasis en su resistencia última a compresión, su módulo de elasticidad (MOE) y la densidad en diversas condiciones: húmeda, anhidra y al 12 % de humedad normalizada. Además, se planteó una comparación de estos resultados con investigaciones previas sobre este clon en particular, con el fin de ofrecer una visión más amplia y profunda de sus propiedades.

La metodología empleada para este estudio se basó en los lineamientos establecidos por la norma europea UNE: EN 384. Para ello, se debieron confeccionar probetas prismáticas, las cuales se ensayaron en la Máquina Universal de Ensayos (MUE); finalmente con los datos obtenidos se realizó un exhaustivo análisis.

Este estudio no solo busca aportar datos técnicos sobre el comportamiento de la madera de álamo en condiciones de compresión, sino también contribuir a una mejor comprensión de las características de este material en el contexto de su uso en la ingeniería estructural.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Analizar el mecanismo de rotura en ensayos de compresión paralela a la fibra en madera de *Populus* sp. apuntando a su empleo en la construcción de cuerpos materiales resistentes.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar los ensayos mecánicos de compresión paralela a la fibra sobre las especies seleccionadas.
- Comparar los resultados de resistencia con distintas geometrías de probetas.
- Definir una probeta sencilla y representativa que se pueda aplicar en los ensayos de rutina en obras construidas con madera.

3. PLAN DE TRABAJO

N°	ACTIVIDADES	TIEMPO DE DURACIÓN									
		SEMANAS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Determinación de edad de los ejemplares	x									
2	Elaboración de probetas de ensayos		x	x							
3	Lijado de probetas		x	x							
4	Ensayos de Compresión				x	x	x				
5	Determinación de densidad					x	x				
6	Análisis de resultados							x	x		
7	Redacción de informe									x	x
8	Entrevista con el Docente Supervisor	x		x		x		x		x	x

Imagen 1: Plan de trabajo para la PPS, distribución semanal de trabajo.

La práctica profesional inició en noviembre de 2024 finalizando en febrero de 2025, cumplimentando en este período las 200 horas requeridas por resolución del Plan de Estudio.

Fecha de inicio de PPS: viernes, 15 de noviembre de 2024.

Fecha de fin de PPS: viernes, 28 de febrero de 2025.

Cantidad de semanas trabajadas: 10

Cantidad de días trabajados: 40

Cantidad de horas trabajadas: 200

Horarios de trabajo: lunes, martes, jueves y viernes de 9 a 14hs.

4. DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA PROFESIONAL EFECTUADA

4.1 La organización

El Laboratorio de Ensayos de Materiales y Estructuras – Sede Junín (LEMEJ) es un laboratorio creado por la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA), dedicado al asesoramiento, capacitación y prestación de servicios a terceros en el área de materiales, estructuras, construcciones y productos industriales. Estos servicios tienen por objetivo, por un lado, garantizar que todo lo que se libre al uso público tenga un margen de seguridad acorde con la normativa vigente y, por otro, el mejoramiento de su calidad, nivel de prestaciones y durabilidad.

Dentro del laboratorio también se desarrollan actividades de investigación en los distintos campos mencionados, con el fin de generar conocimiento científico y promover la transferencia tecnológica.

Su ubicación geográfica le aporta como zona de influencia el noroeste de la provincia de Buenos Aires, con proyección al resto del país. Asimismo, desde junio del 2022, el LEMEJ es un Centro asociado de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) permitiendo un mayor alcance de los resultados obtenidos en las líneas de investigación y una mayor vinculación con diversas áreas de la provincia de Buenos Aires.

Los laboratorios y salas de ensayos del LEMEJ cuentan con maquinaria e instrumental de última generación destinado a controles, dosificaciones, análisis, caracterización de

materiales, ensayos mecánicos, etc. y el desarrollo de las actividades se realiza con recursos humanos altamente capacitados.

Como respaldo técnico, el mismo laboratorio cuenta con una Biblioteca propia que contiene las Normas y Reglamentos de aplicación en el país y la región, así como sus equivalentes extranjeros que resultan aconsejables por su calidad o novedad: Normas IRAM, Normas RILEM, Reglamentos CIRSOC, etc. permitiendo redactar los informes de acuerdo con los requisitos establecidos.

El LEMEJ trabaja en colaboración, mediante la firma de convenios específicos, con otras instituciones destinadas a desarrollar actividades similares o complementarias, tales como: Municipalidad de Junín, EEST N° 1 “Antonio Bermejo” de Junín, Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario e Investigación Tecnológica (LEMIT) de La Plata, etc. Además, participa en redes temáticas y de discusión técnica de la Federación Internacional del Hormigón (*fib*) y de la Organización Internacional de Laboratorios (RILEM).

La organización se divide en cuatro áreas: técnica, administrativa, mantenimiento y soporte, y el cuerpo directivo.

En la Imagen 2 se dispone el organigrama del LEMEJ.

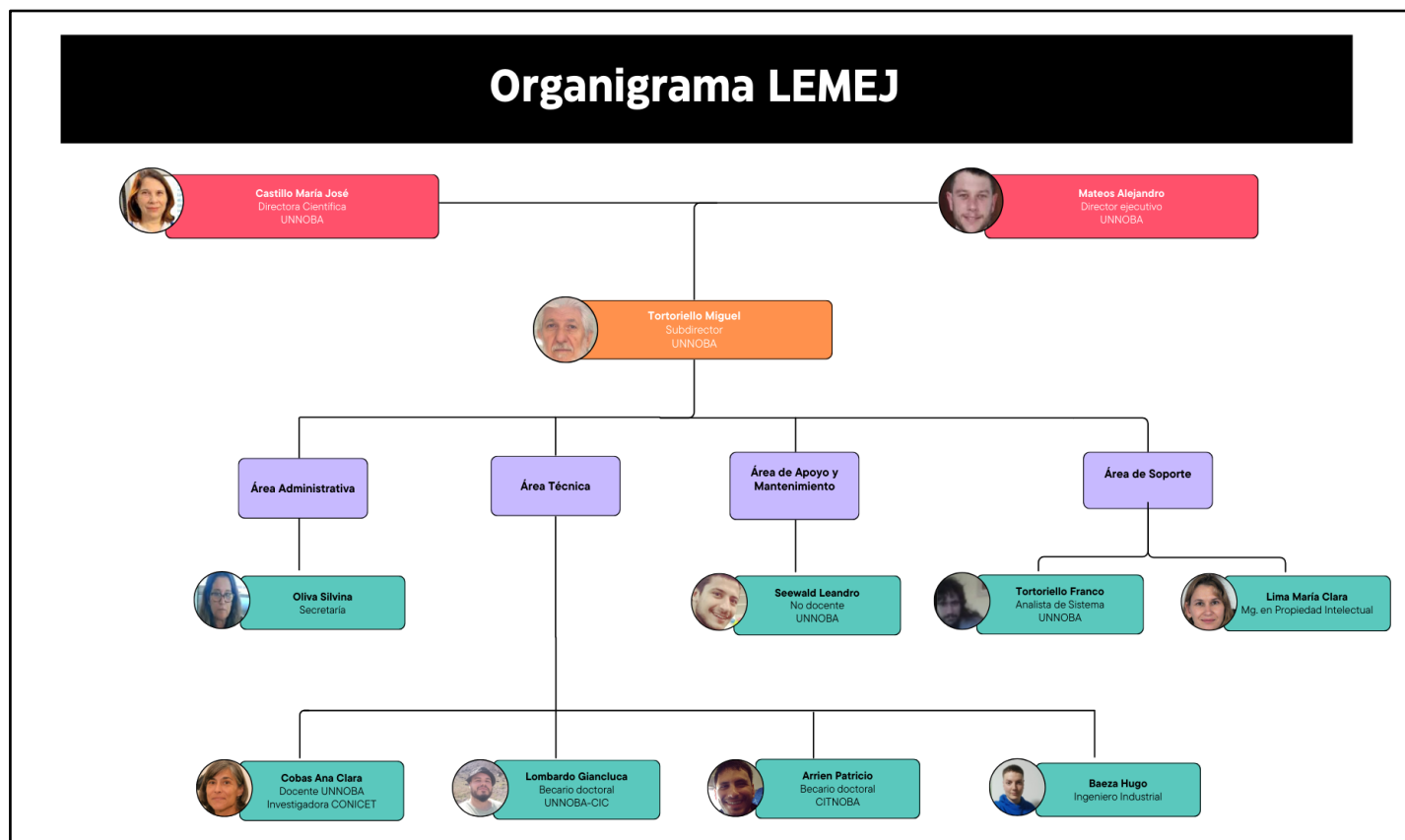


Imagen 2: Organigrama del LEMEJ.



Imagen 3: Vista exterior del LEMEJ.

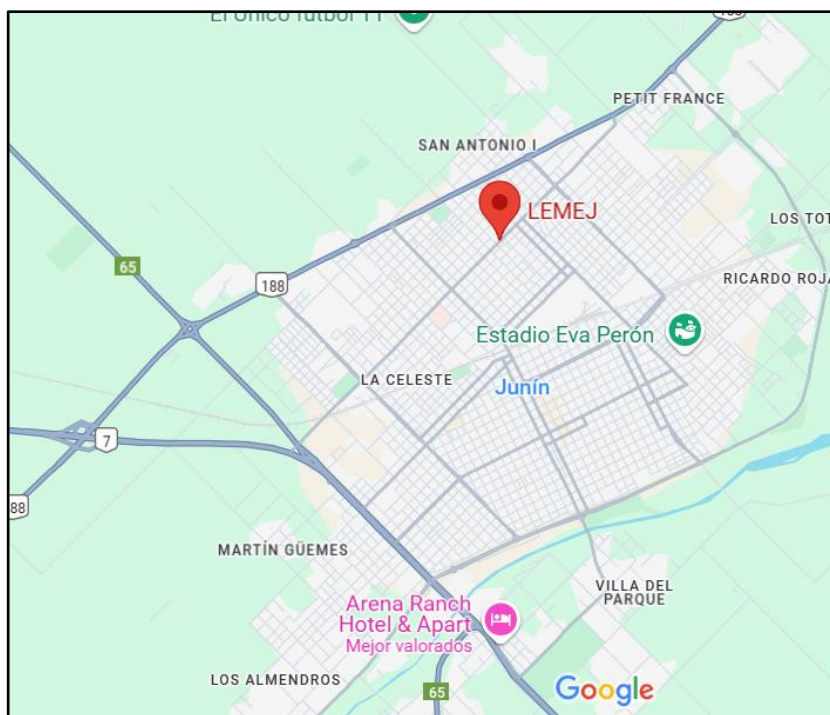


Imagen 4: Ubicación geográfica de LEMEJ, calle Domingo Faustino Sarmiento 1.169, Junín, Buenos Aires.

4.2 Generalidades de la especie

- Familia: Salicaceae
- Nombre científico: *Populus Deltoides* "Stoneville 67"
- Etimología: El nombre deriva del latín, 'popular' por ser abundante y en gran cantidad. *Deltoides*: epíteto latino que significa "con forma triangular".
- Nombre común: Álamo negro

Las salicáceas son árboles o arbustos, dioicos o rara vez monoicos, de madera suave, corteza lisa a rugosa; hojas alternas, simples, estipuladas, pecioladas, deciduas o a veces persistentes, margen generalmente dentado y por lo común cada diente termina en una glándula; inflorescencias racimosas o en forma de espigas, en las axilas de las hojas o en brotes foliares; flores unisexuales, protegidas por brácteas; perianto formado por un disco cupuliforme o por 1 o 2 glándulas o escamas; las estaminadas con 1 o más estambres insertos en un receptáculo, con los filamentos unidos cerca de la base o libres, anteras

biloculares con dehiscencia longitudinal; las pistiladas con el ovario unilocular con numerosos óvulos, estigmas 2 a 4, simples o partidos, sin estaminodios; fruto una cápsula que abre en 2 a 4 valvas; semillas pequeñas sin endosperma, con un denso mechón de pelos sedosos, por lo general blancos, dispuestos a manera de vilano (Eleazar Carranza G., 1995).

Familia de distribución boreal que falta solamente en Australia, Tasmania, Nueva Zelanda y en el extremo austral de Sudamérica (Santa Cruz y Tierra del Fuego). Compuesta por unas 400 a 600 especies reunidas en 4 géneros: *Salix* L., es el más numeroso, agrupa los “sauces” y “mimbres”; *Populus* L., que contiene los “álamos”. *Chosenia* Nakai y *Euphatodendron* Charendon & Semizoglu son asiáticos y monotípicos (Novara, J., 2012).

En Argentina constituyen el tercer cultivo forestal en importancia detrás de los pinos (59,64 %) y eucaliptos (27,07 %) con un 6,28 % de las hectáreas forestales alcanzando las 80386 ha, divididas en 43.129 ha para los sauces y 37.188 ha para los álamos.

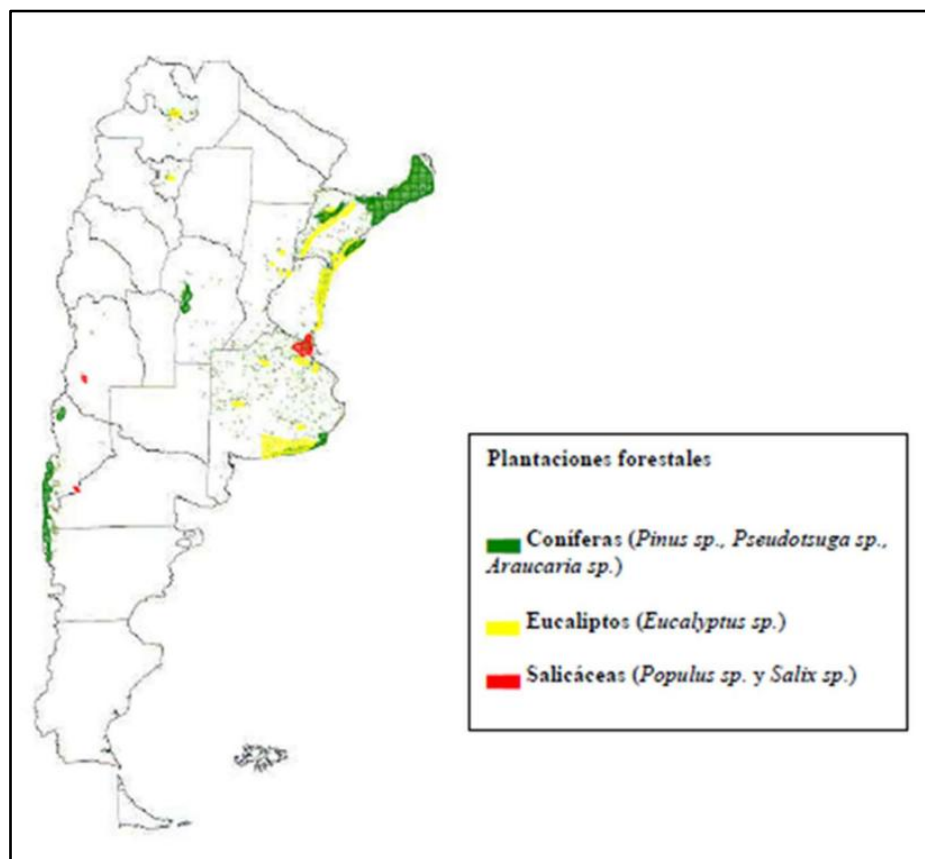


Imagen 5: Ubicación geográfica de las plantaciones forestales en Argentina (CNA, 2012)

4.3 Panorama general del *Populus Deltoides* en el mundo y en la Argentina

El área de dispersión natural del género *Populus* se encuentra en el hemisferio norte. Comprende cinco grupos o secciones: *Leuce*, que se encuentra por todo el hemisferio norte; *Tacamahaca* en Asia y América del Norte; *Aigeiros* en la zona templada del hemisferio norte; *erucoides*, que crece en la parte sureste de América del Norte y en el Extremo Oriente y *Turanga*, de la cuenca mediterránea (Di Marco, E. 2014).

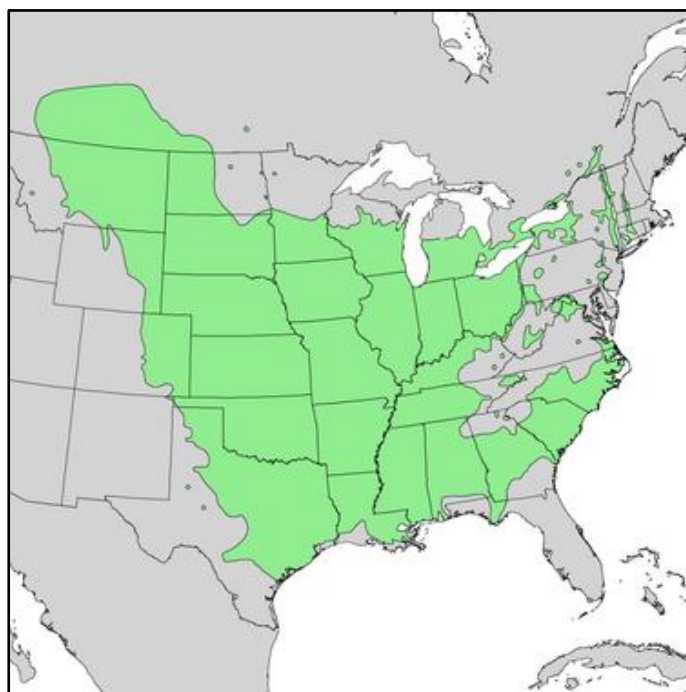


Imagen 6: Región autóctona del *Populus Deltoides* (Wikipedia)

La superficie total dedicada al cultivo de álamo en nuestro país se estima en 37.000 hectáreas, distribuidas principalmente en las regiones de Cuyo, el Delta del Paraná, las provincias de Buenos Aires y Santa Fe, así como en los oasis de riego de Mendoza, el valle del Río Negro y San Juan (Di Marco, E., 2014). En particular, la especie *Populus Deltoides* ocupa alrededor de 3.800 hectáreas, concentrándose en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, el Delta del Paraná, algunas zonas de Mendoza y el centro del país, incluyendo las provincias de Córdoba y San Luis. El clon Stoneville 67 abarca un total de 274 hectáreas, que se distribuyen principalmente en los municipios de Campana

y San Fernando, aunque también se encuentran algunas parcelas en localidades como Morse, L. N. Alem y 25 de Mayo. En cuanto a la edad de las plantaciones, se observa la siguiente distribución: el 5,47 % de las plantas tienen entre 0 y 6 años, el 34,67 % entre 7 y 12 años, el 38,69 % entre 13 y 18 años, y el 21,17 % superan los 18 años de edad (MAGYP, Ministerio de Economía, 2024).

La madera de esta especie se caracteriza por un color de albura blanca y un duramen de tono blanco amarillento, con un brillo suave y una textura homogénea. Su diseño presenta un veteado muy sutil en el corte longitudinal tangencial y una superficie lisa en el corte radial. Se clasifica como una madera de baja durabilidad, ya que su duramen es poco resistente al ataque de hongos y es susceptible a la acción de insectos, mientras que la albura es vulnerable a los hongos cromógenos y a los insectos perforadores. Cuando entra en contacto con el suelo, su vida útil máxima no supera los 5 años. En cuanto a su trabajabilidad, se manipula con facilidad, sin presentar dificultades en el aserrado ni en el debobinado (Di Marco, E., 2014).



Imagen 7: Plantación de álamo en el Establecimiento Forestal San José, Morse, Buenos Aires.

4.4 Foresto-Industria en Argentina

El sector foresto-industrial se compone de los segmentos de madera sólida transformada (transformación física) y celulosa y papel (transformación química). En sentido amplio, hablamos de todas las actividades que impliquen una transformación sobre el recurso maderable (Mora Alfonsín, L. 2023). Las mismas se muestran en la Imagen 8.

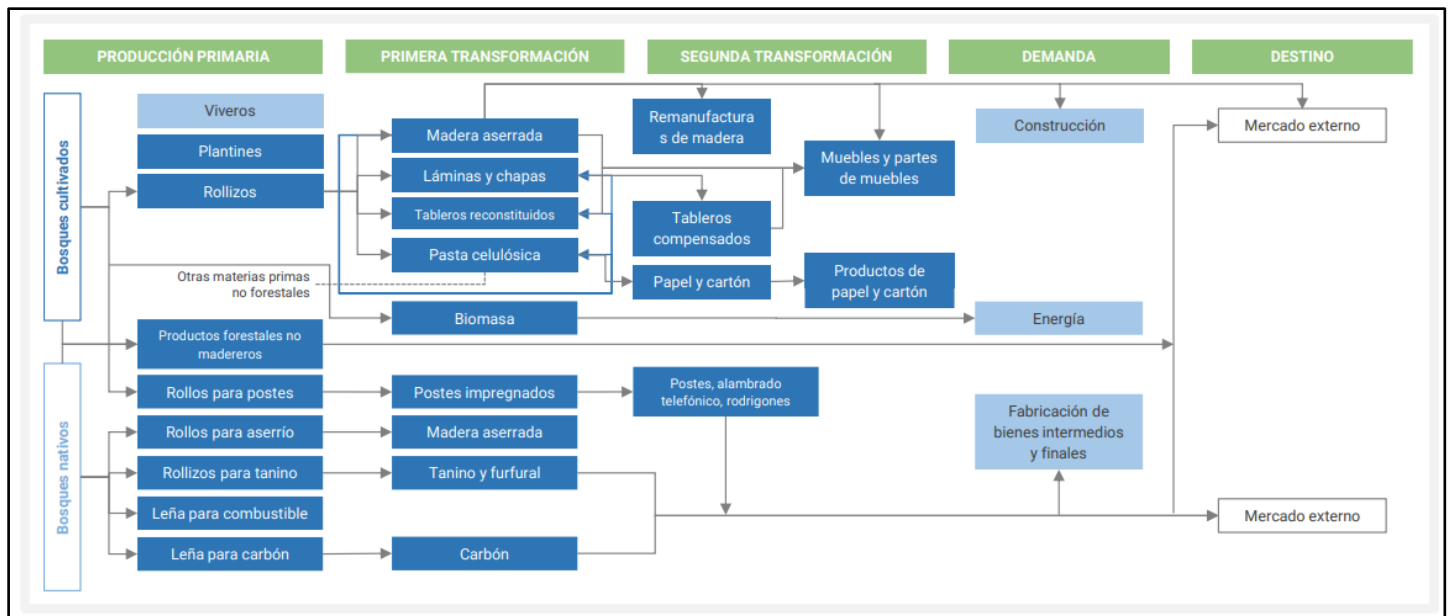


Imagen 8: Foresto-Industria (Gorzycki y Ruggiero, 2016).

Cerca del 70 % de la producción anual de madera en rollo industrial se destina al sector papel y cartón, el 24,4 % a productos de madera y el 4,9 % para silvicultura (Imagen 9).

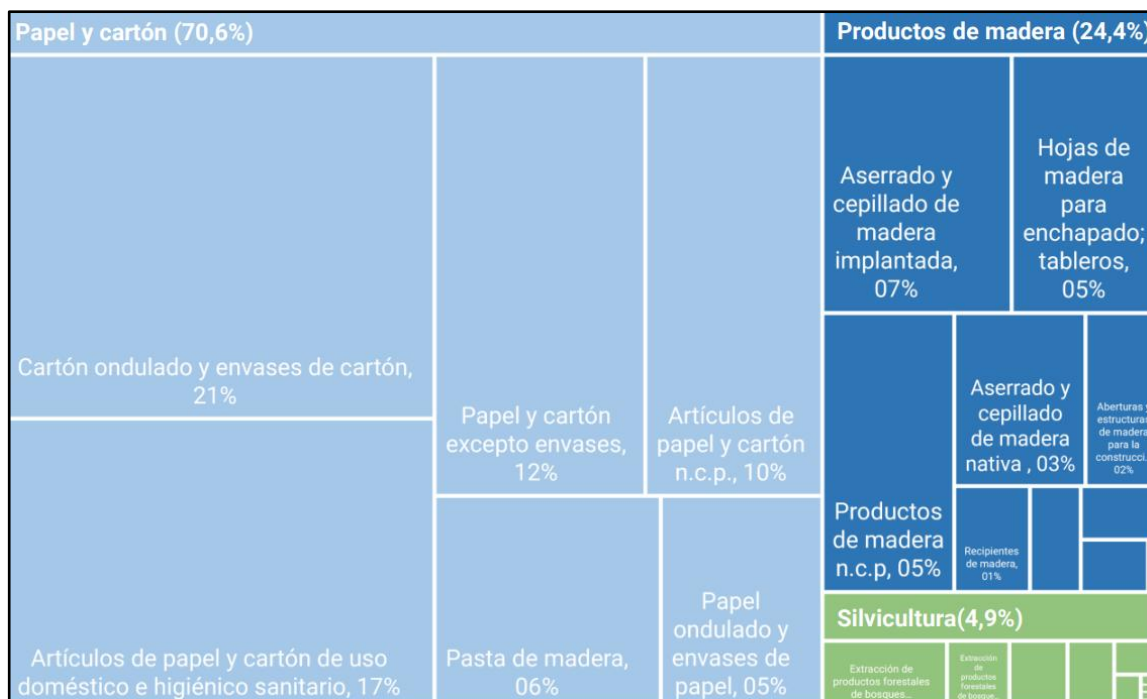


Imagen 9: (Mora Alfonsín, L. 2023).

En el caso particular del *Populus Deltoides*, sus usos son diversos, como en la fabricación de encofrados, tirantes, cajones, muebles, fosos, vigas e instrumentos.

Es importante destacar el papel de la construcción, tanto en Argentina como a nivel mundial, donde la crisis habitacional ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles desde una perspectiva ambiental y económica. Esto ha facilitado la incorporación de la madera como material alternativo en lugar de la construcción tradicional.

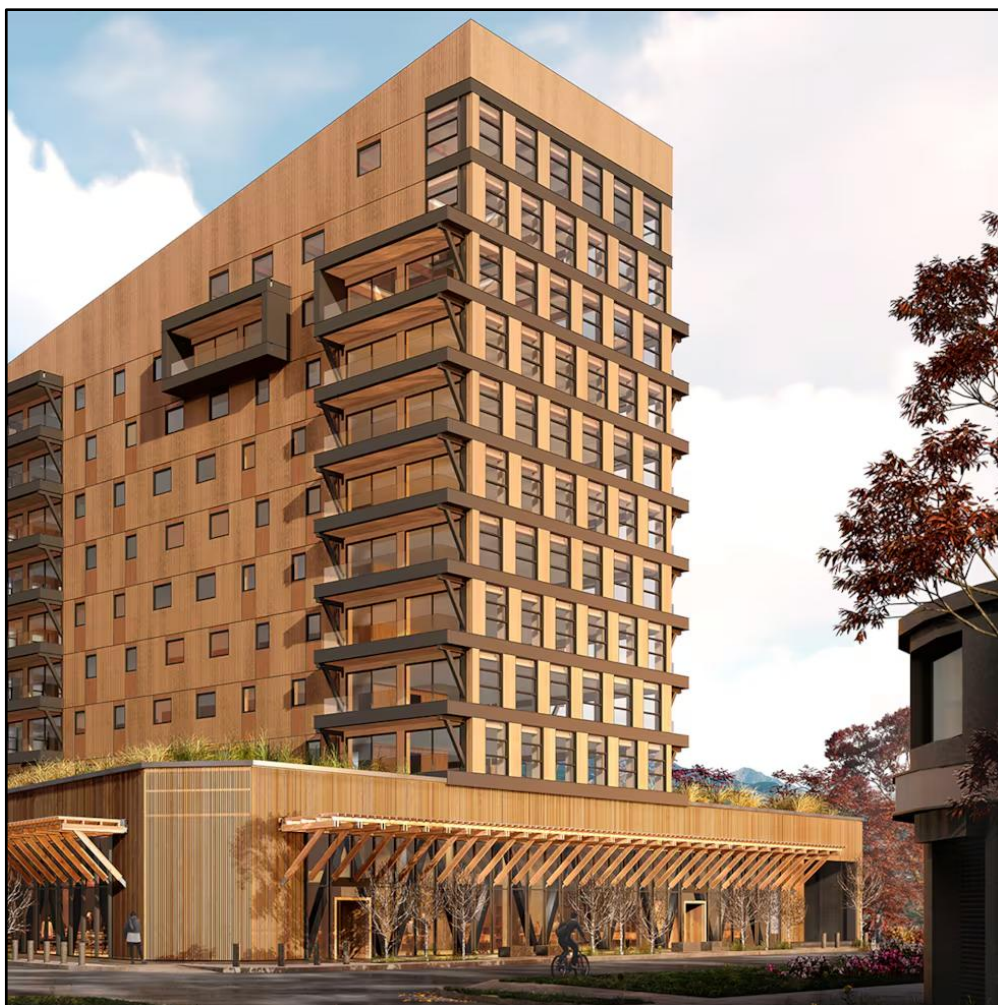


Imagen 10: Edificio Tamango, Coyhaique, Chile (El País).

4.5 Práctica llevada a cabo

4.5.1 Muestreo

El material con el que se trabajó fue la madera de *Populus Deltoides* “Stoneville 67” proveniente de una plantación comercial en el establecimiento Forestal San José, Morse, Partido de Junín, Buenos Aires, Argentina (34° 45’ Lat. Sur, 60° 50’ Long. Oeste). El clima es templado húmedo, con temperatura anual promedio de 15,9 °C y precipitaciones promedio de 1.014 mm (concentradas de noviembre a marzo). Los suelos son francos arenosos del tipo Hapludol. Las plantaciones del establecimiento están principalmente destinadas a madera para aserrado (85 % de la producción), el resto (15 %) se

comercializa para triturado (Cobas, A.C.; Iurritia, E. y Tortoriello, M, 2022) (Imágenes 11 y 12).



Imagen 11: Delimitación del área del Establecimiento Forestal San José.

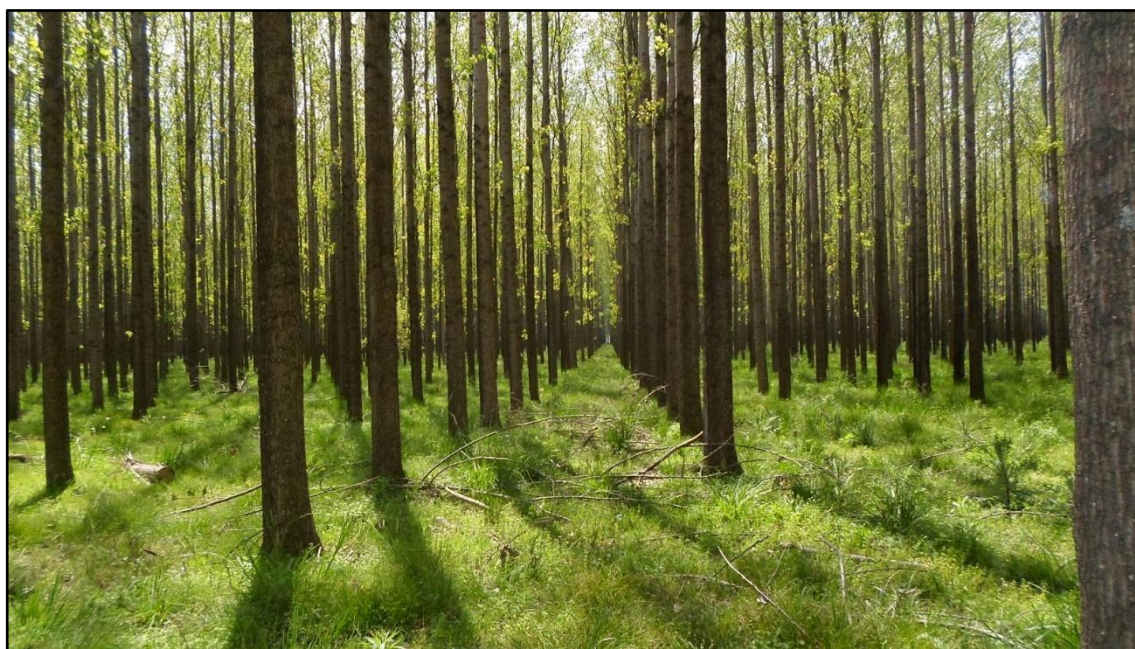


Imagen 12: Plantación de álamo.

Se seleccionaron al azar 5 árboles para respetar las pautas de representatividad dentro la población (Imagen 13).



Imagen 13: Apeo de ejemplar de álamo a estudiar.

Se obtuvieron trozas y rodajas correspondientes de los primeros 4 metros. Las rodajas fueron llevadas al LEMEJ y las trozas fueron enviadas al Aserradero Euskadi perteneciente al grupo Urionagüena S.H para su procesamiento en tablones de dimensiones 125 cm x 25 cm x 5 cm.



Imagen 14: Tablones procesados de álamo.

4.5.2 Dimensionamiento del material de ensayo

Los tablones originales que se encontraban en mejores condiciones fueron redimensionados y acondicionados, de acuerdo a las normativas de ensayo correspondientes, en piezas de diferentes tamaños.

Para la confección de las probetas primero se cortaron los tablones, en una sierra combinada y obteniéndose listones de madera, los cuales fueron procesados en una sierra ingletadora para obtener finalmente las probetas. Se confeccionaron 240 probetas prismáticas de sección cuadrada (5 cm x 5 cm); 60 por cada una de las 4 diferentes relaciones de esbeltez (relación alto-lado de la sección): (3:1, 4:1, 5:1 y 6:1).



Imagen 15: Mediciones previas de los listones.

4.5.3 Lijado y Nomenclatura

Cada probeta fue superficialmente alisada utilizando una lijadora de banda. Se verificó meticulosamente que las testas estuvieran bien mecanizadas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje de la probeta, asignándoles un código de identificación único.



Imagen 16: Lijado de probetas.

4.5.4. Resistencia a la compresión

El ensayo se realizó según la norma UNE EN 408:2011+A1:2012, en cual se llevaron todas las probetas a rotura en la Máquina Universal de Ensayos (MUE), a través de cargas progresivas de compresión paralelas a las fibras, obteniendo los valores de las gráficas generadas por la MUE.

La fuerza máxima se alcanzó en un tiempo de $300 \text{ s} \pm 120 \text{ s}$. Para la determinación de la resistencia a la compresión ($f_{c,0}$) se utilizó la expresión 1 (Imagen 17).

$$f_{c,0} = \frac{F_{max}}{A} \quad (1)$$

F_{max} es la carga máxima en Newton.

A es el área de la sección transversal en milímetros cuadrados.



Imagen 17: Ensayo de compresión.

4.5.5. Densidad

Para la determinación de la densidad normal se tomaron probetas de cada una de las relaciones de esbeltez (Normas IRAM 9544/ EN 408). El volumen verde se calculó por desplazamiento de fluidos (inmersión en agua) sobre las probetas saturadas en agua (humedad mayor al 30 %).

Finalmente se procedió al secado en una estufa, bajo las normativas (UNE 384:2016+A1 /UNE-EN 13.183) que establecen colocar las probetas a una temperatura de 103 °C durante un periodo de 24 h hasta la obtención de pesos constantes y así determinar la densidad anhidra.



Imagen 18: Secado en estufa de las probetas.

4.5.6 Módulo de Elasticidad

Para el ensayo de las probetas destinadas a la determinación del módulo de elasticidad, fue necesario diseñar un dispositivo de soporte para los dos comparadores Mitutoyo de precisión 0,001 mm y carrera máxima de 12 mm, colocados simétricamente a cada lado de la probeta a fin de obtener valores precisos. El valor de cada uno de los comparadores conjuntamente con el de la carga aplicada a la probeta se colocaron en una planilla de cálculo que permitió el trazo de curvas precisas. La carga se aplicó a una velocidad constante de 0,45; 0,60; 0,75; y 0,90 mm/minuto para cada una de las diferentes relaciones de esbeltez (3:1, 4:1, 5:1, 6:1). Se garantizó que cada probeta estuviera perfectamente centrada con el cilindro de carga y alineada con el mismo, utilizando unos platos de apoyo especiales contruidos para tal fin y una rótula para asegurar una posición estable. Las deformaciones se midieron en el tramo central de cada probeta para evitar el efecto de Saint-Venant. Este proceso meticuloso y detallado garantizó la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos durante los ensayos.

Para la determinación del módulo de elasticidad $E_{c,0}$ se seleccionan los datos que presentaron, entre la carga y la deformación, una correlación superior a 0,99. Para la determinación del módulo de elasticidad se utilizó la expresión 2.

$$E_{c,0} = \frac{l_1 (F_2 - F_1)}{A (w_2 - w_1)} \quad (2)$$

$F_2 - F_1$ es un incremento de carga en la parte recta de la curva carga-deformación en newton.

$w_2 - w_1$ es el incremento de deformación correspondiente a $F_2 - F_1$ en milímetros.

l_1 es la longitud de la base de medida de las deformaciones en milímetros.

A es el área de la sección transversal en milímetros cuadrados.

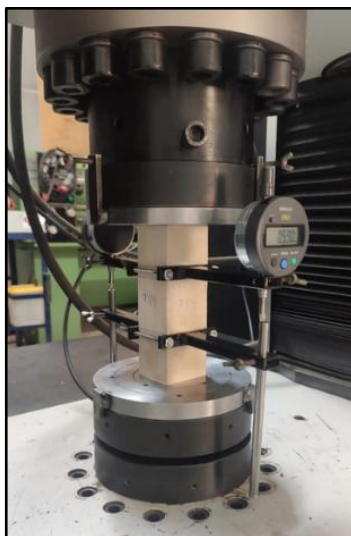


Imagen 19: Ensayo de compresión para determinar MOE.

4.5.7 Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presenta el análisis estadístico de los valores de resistencia a la compresión paralela a las fibras ($f_{c,0}$) ajustada a la humedad de referencia del 12 %, por cada relación de esbeltez.

Relación de esbeltez	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	n
3:1	29.72	42.02	46.01	34.43	4.20	30
4:1	31.54	41.02	46.22	34.09	3.81	30
5:1	31.14	39.03	46.77	31.76	5.19	30
6:1	29.82	37.81	47.87	30.00	6.39	30
Todas	29.72	39.97	47.87	32.57	4.90	120

Tabla 1: Resistencia a la compresión paralela a la fibra por cada relación de esbeltez (MPa).

Del análisis estadístico comparativo entre las diferentes relaciones, se observa que el límite de rotura mecánico es inferior en las probetas más esbeltas, lo que se corresponde con los efectos adicionales de flexo-compresión. La Imagen 20 presenta el gráfico de caja y bigotes de todas las relaciones.

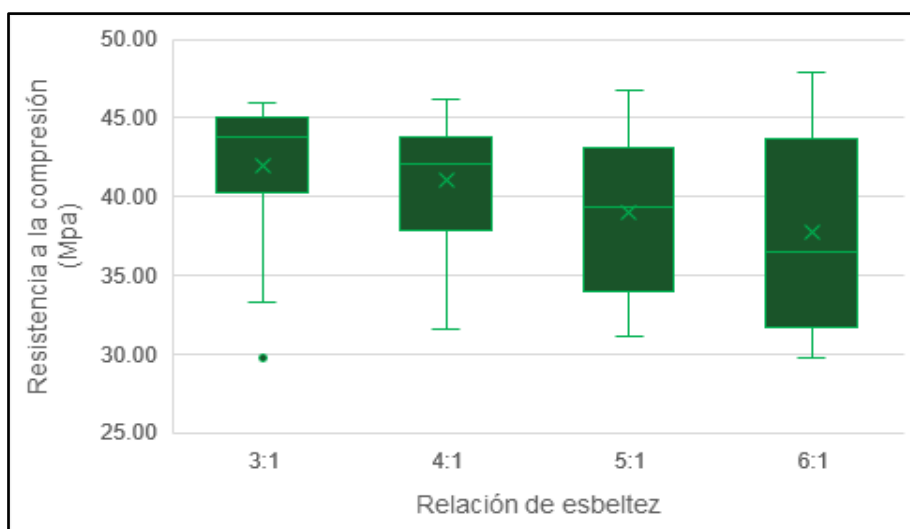


Imagen 20: Gráfica de caja y bigotes de todas las relaciones.

Al comparar con el estudio de Guillaumet et al. (2017), en el que se reportó una resistencia última a la compresión de 35 MPa, se aprecia una variación del 14,2 % con respecto al valor obtenido en el clon continental de la misma especie.

En la Tabla 2 se presentan los valores estadísticos de densidad, ajustados a la humedad de referencia del 12 %, obtenidos en las probetas sobre las que se realizaron los ensayos de compresión paralela a las fibras, según relación de esbeltez.

Relación de esbeltez	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	n
3:1	425.74	489.14	599.56	442.98	29.61	60
4:1	409.00	480.94	554.58	427.01	34.81	60
5:1	421.59	471.50	532.85	436.08	23.13	60
6:1	398.27	469.16	532.68	428.74	22.17	60
Todas	398.27	477.69	599.56	433.70	27.43	240

Tabla 2: Densidad por relación de esbeltez al 12 % de humedad (kg/m³).

Del análisis estadístico comparativo entre las diferentes relaciones se obtiene que no existe una diferencia estadísticamente significativa en la densidad entre las diferentes piezas. La Imagen 21 presenta el gráfico de caja y bigotes de ambas poblaciones.

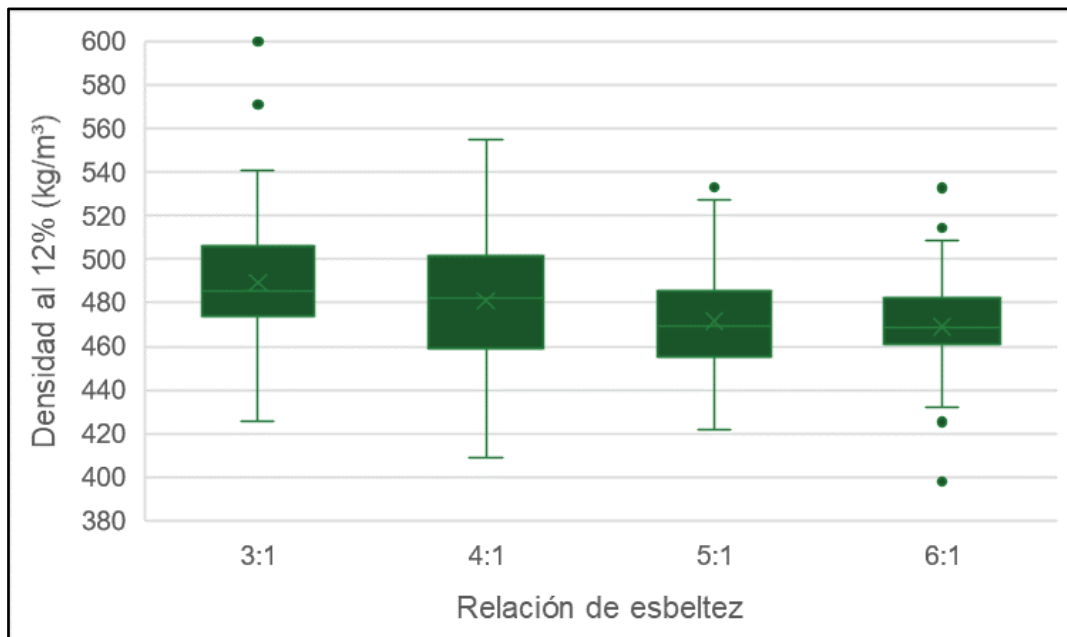


Imagen 21: Gráfica de caja y bigotes de todas las relaciones.

Al comparar con los trabajos presentados por Guillaumet et al. (2017a, 2017b, 2019) en los cuales reportó densidades de diferentes clones de álamos (incluido el Stoneville 67) de 468 kg/m³, 441 kg/m³ y 461 kg/m³, se observa que nuestro estudio muestra una densidad levemente superior.

En la Tabla 3 se presentan los valores estadísticos de densidad húmeda o verde, obtenidos en las probetas sobre las que se realizaron los ensayos de compresión paralela a las fibras, según relación de esbeltez.

Relación de esbeltez	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	n
3:1	401.85	461.67	565.88	418.12	27.94	60
4:1	386.01	453.93	523.43	403.05	32.85	60
5:1	397.93	445.02	502.93	411.59	21.84	60
6:1	375.89	443.02	502.77	404.67	20.83	60
Todas	375.89	450.91	565.88	409.36	25.86	240

Tabla 3: Densidad húmeda por relación de esbeltez (kg/m³).

Del análisis estadístico comparativo entre las diferentes relaciones se obtiene que no existe una diferencia estadísticamente significativa en la densidad entre las diferentes piezas. La Imagen 22 presenta el gráfico de caja y bigotes de ambas poblaciones.

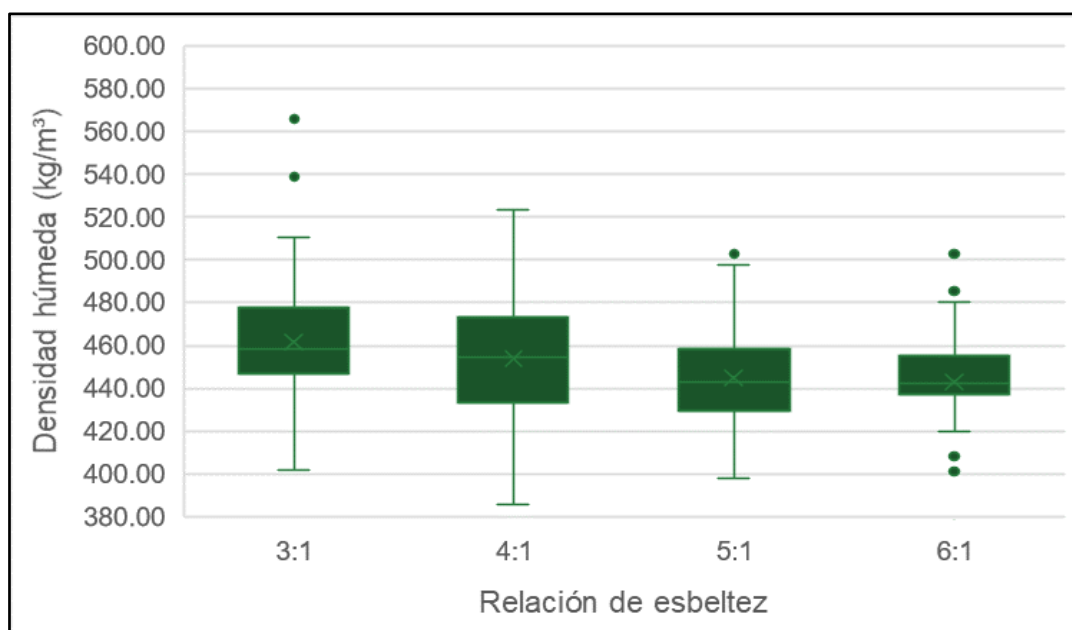


Imagen 22: Gráfica de caja y bigotes de todas las relaciones.

En la Tabla 4 se presentan los valores estadísticos de densidad seca o anhidra, obtenidos en las probetas sobre las que se realizaron los ensayos de compresión paralela a las fibras, según relación de esbeltez.

Relación de esbeltez	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	n
3:1	384.34	440.02	485.45	401.80	22.07	60
4:1	363.61	431.57	495.84	378.82	30.77	60
5:1	370.82	418.90	467.65	374.05	22.68	60
6:1	359.93	415.12	478.81	372.86	21.52	60
Todas	359.93	426.40	495.84	381.88	24.26	240

Tabla 4: Densidad anhidra por relación de esbeltez (kg/m³).

Del análisis estadístico comparativo entre las diferentes relaciones se obtiene que no existe una diferencia estadísticamente significativa en la densidad entre las diferentes piezas. La Imagen 23 presenta el gráfico de caja y bigotes de ambas poblaciones.

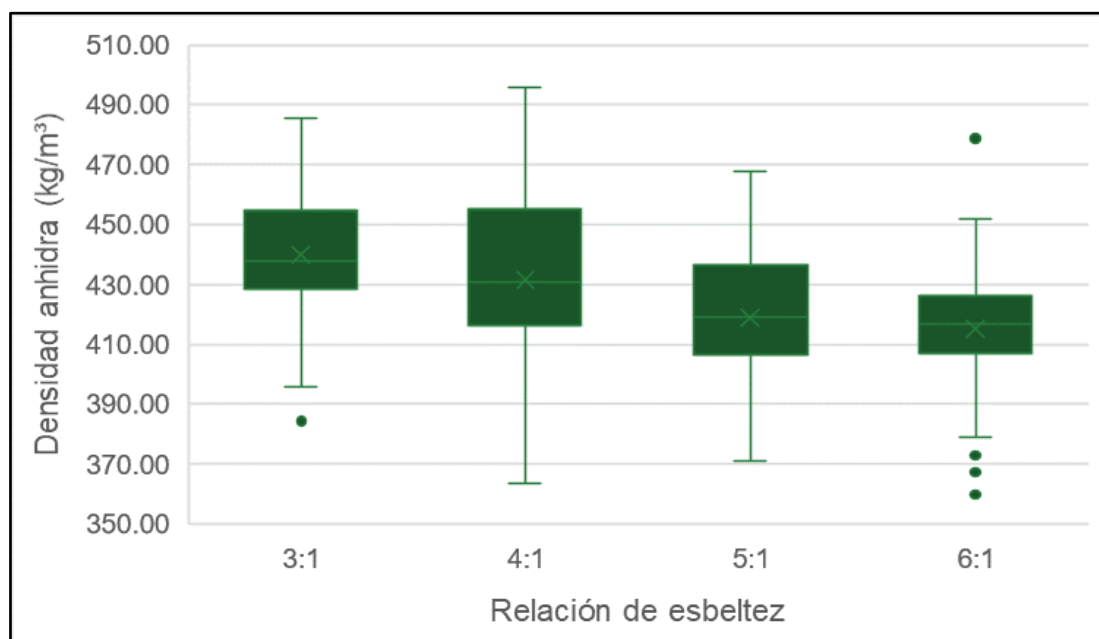


Imagen 23: Gráfica de caja y bigotes de todas las relaciones.

En la Tabla 5 se presentan los valores estadísticos del módulo de elasticidad obtenidos en los ensayos de compresión paralela a las fibras ajustados a la humedad de referencia del 12 %, por relación de esbeltez.

Relación de esbeltez	Mínimo	Medio	Máximo	Percentil 5%	Desvío	n
3:1	4,191.86	10,064.15	16,861.38	5,351.74	3,162.73	23
4:1	6,933.77	11,367.10	17,052.00	8,045.51	2,361.30	29
5:1	6,507.39	11,882.10	16,621.09	8,586.17	2,125.97	29
6:1	8,533.11	12,685.80	14,749.48	10,569.53	1,429.49	29
Todas	4,191.86	11,499.79	17,052.00	8,138.24	2,269.87	110

Tabla 5: Módulo de elasticidad en compresión paralela por relación de esbeltez (MPa).

El análisis estadístico comparativo entre las distintas relaciones muestra que no se observa una diferencia estadísticamente significativa en el módulo de elasticidad a la compresión paralela entre los diferentes casos, con respecto a los factores de ponderación y seguridad propuestos por el Reglamento CIRSOC 601. La Imagen 24 presenta el gráfico de caja y bigotes de todas las relaciones.

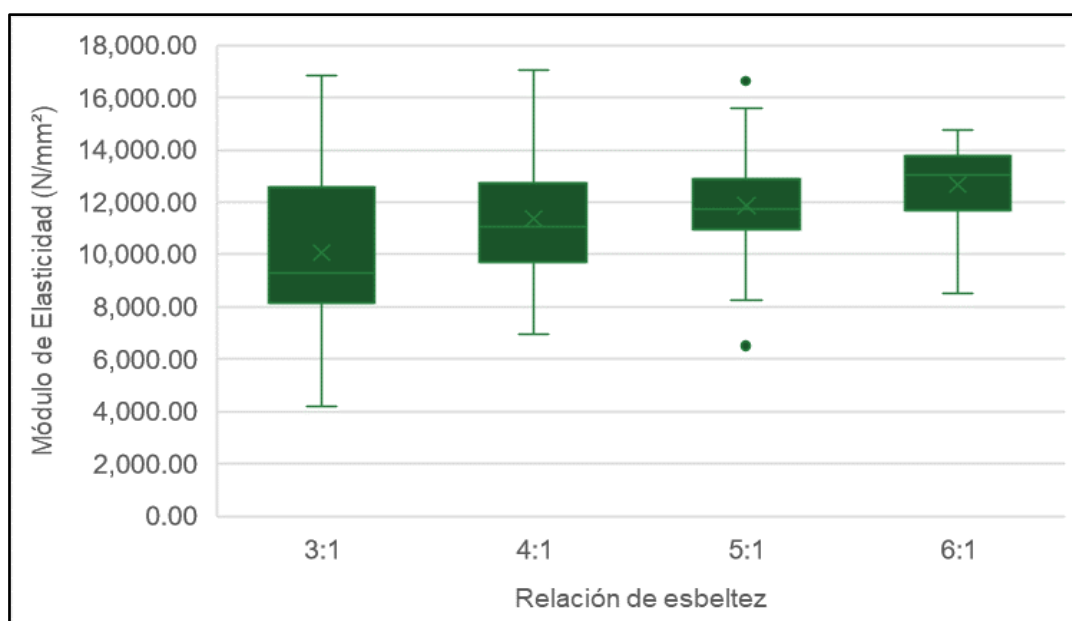


Imagen 24: Gráfica de caja y bigotes de todas las relaciones.

A continuación, se enumeran las probetas que fueron descartadas para el análisis del módulo de elasticidad, y sus motivos:

1. ST-C(E)-3:1-5: Existe un error metodológico dentro del periodo de los primeros 24 kN de carga en los cuales la deformación promedio es negativa.

2. ST-C(E)-3:1-12: No alcanza, en momento alguno, el 99 % de correlación entre la deformación y la carga aplicada.
3. ST-C(E)-3:1-13: Existe error metodológico dentro del periodo de los primero 20 kN de carga en el cual la deformación promedio es negativa y constante.
4. ST-C(E)-3:1-14: Existe error metodológico dentro del periodo de los primeros 10 kN de carga en el cual la deformación promedio es negativa.
5. ST-C(E)-3:1-17: Existe un error metodológico en el cual el comparador 1 (C1) no muestra deformación hasta los 40 kN de carga.
6. ST-C(E)-3:1-19: Existe un error metodológico dentro del periodo de los primeros 13 kN de carga en el cual la deformación promedio es negativa.
7. ST-C(E)-3:1-21: Existe un error metodológico dentro del periodo de los primeros 25 kN de carga en el cual la deformación promedio es negativa.
8. ST-C(E)-4:1-28: Existe error metodológico dentro del periodo de los primero 10 kN de carga en el cual la deformación promedio es nula.
9. ST-C(E)-5:1-19: Existe un error metodológico que provocó una deformación estabilizada de forma permanente en el C1.
10. ST-C(E)-6:1-07: Existe un error metodológico que provocó una deformación exacerbada en ambos comparadores.

Al comparar con los trabajos de Guillaumet et al. (2017 a, 2017 b, 2019) que reportaron valores de 11.687 N/mm², de 10.929 N/mm², y 11.315 N/mm², se observa que nuestros resultados son levemente superiores.

4.5.8 Análisis de la relación entre la esbeltez y la resistencia última

La resistencia de la madera es una de sus características más valoradas, y está directamente relacionada con el grado de esbeltez del material en cuestión. En nuestro caso, observamos que, a mayor relación de esbeltez, disminuyen tanto la densidad como la resistencia última a la compresión. Estos resultados son completamente coherentes, ya

que los cuerpos más esbeltos están sujetos a efectos de flexo-compresión que afectan su comportamiento estructural. Esto se observa en la Imagen 25.

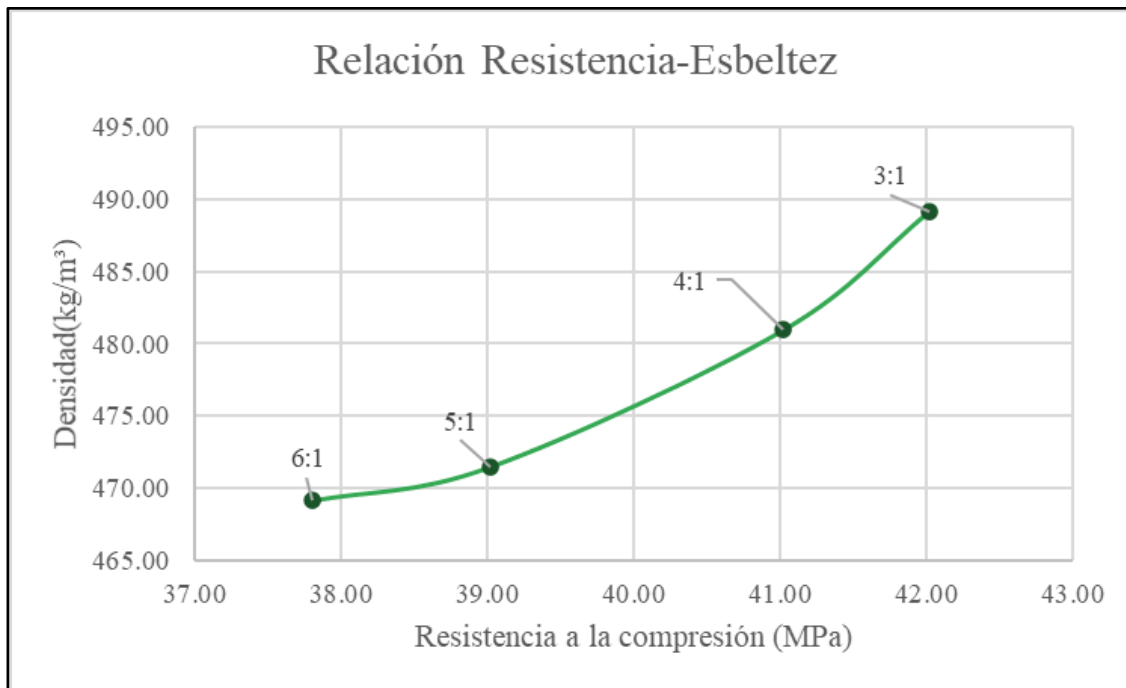


Imagen 25: Relación densidad al 12 % y resistencia última a compresión.

5. CONCLUSIÓN

El álamo *Stoneville 67*, proveniente de la localidad de Morse mostró un comportamiento a compresión paralela similar al de investigaciones previas en la misma localidad, destacándose ligeramente en términos de densidad y resistencia última. Esta superioridad puede atribuirse a la comparación entre los clones semisumergidos y continentales. Sin embargo, en lo que respecta al módulo de elasticidad, no se observó una diferencia significativa entre los mismos.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente y con base en investigaciones previas, se recomienda que el CIRSOC e IRAM 9662-4 incluyan los valores del clon *Populus deltoides* continental de Morse, dado que los resultados obtenidos en esta investigación

superan en un 20 % los valores propuestos en el manual del *Populus del Delta*, especialmente en términos de densidad y módulo de elasticidad.

Por otro lado, se verificó la relación entre la esbeltez y la resistencia última a la compresión. Dado que los cuerpos de madera a utilizar de forma estructural serán vigas de grandes dimensiones, se optó por utilizar la probeta con una relación de esbeltez 6:1, la cual refleja de manera más precisa las condiciones reales de uso, en consonancia con la normativa europea.

En conclusión, esta práctica ha sido una etapa crucial en mi formación, ya que me ha proporcionado herramientas tanto técnicas como analíticas, además de habilidades humanas, que son esenciales para enfrentar los desafíos del mercado laboral.

6. BIBLIOGRAFÍA

Cichero, R., Carboni, F., Lombardo, G., Zorrilla, L., (2018). *Resistencia al Aplastamiento en Madera de Álamo para Uniones Mecánicas de Diámetro 5 mm*. XXVII JJI UNCUIYO-AUGM.

CIRSOC 601. 2016. “Reglamento Argentino de Estructuras de Madera”. INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) - CIRSOC (Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles). 176 pp.

CIRSOC 601. 2020. “Suplementos del Reglamento Argentino de Estructuras de Madera”. INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) - CIRSOC (Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles). 49 pp.

Cobas, A.C.; Iurritia, E. y Tortoriello, M (2022). *Madera juvenil en Populus deltoides ‘Stoneville 67’: análisis de la variación de la densidad en el fuste*. FAVE - Ciencias Agrarias 21 (2). CC BY-NC-SA 4.0.

Colaboradores de Wikipedia (2024). *Populus deltoides*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Populus_deltoides.

Di Marco, E. (2014). *Populus sp (Álamo, chopo) Familia Salicáceas*. Dirección de Producción Forestal - MAGyP.

Eleazar Carranza, G. (1995). *Flora del Bajío y de regiones adyacentes: "Salicaceae"*. Instituto de Ecología, A.C. Centro Regional del Bajío Pátzcuaro, Michoacán.

Gorzycki, R., Ruggiero, M. (2016). *"Informe de cadenas de valor: forestal, papel y muebles"*. Ministerio de Hacienda y Finanzas Públicas- Subsecretaría de Planificación Económica.

Guillaumet, A., Filipetti M., Manavella, R., Acuña Rello, L., Piter J. (2017) a *Propiedades resistentes en compresión paralela de la madera Populus deltoides cultivada en el Delta del Río Paraná*

Guillaumet, A., Filipetti M., Tortoriello, M., Mossre, A. (2017) b *Potencial uso estructural de la madera Populus deltoides cultivada en el noroeste de la provincia de Buenos Aires*

Guillaumet, A. (2019). *Comportamiento estructural de la madera de Álamo (Populus deltoides 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67') cultivado en el Delta del Río Paraná*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Tecnológica].

Instituto Nacional de Estadística y Censos (2012). *Censo Nacional Agropecuario*.

IRAM 9544. (1985). "Método para la determinación de la densidad aparente". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 10 pp.

IRAM 9551. (1985). Maderas: método de determinación de la compresión axial o paralela al grano. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. 6 pp.

Laborde, A. (2023). *El edificio sustentable de madera más alto de Latinoamérica se asoma en la Patagonia*. El País

MAGYP (2024). *Tablero de plantaciones forestales*. Ministerio de Economía.

Mora Alfonsin, L. (2023). *La foresto-industria en Argentina: Oportunidades, desafíos y líneas de acción para una estrategia productiva sectorial*. Ministerio de Economía Secretaría de Industria y Desarrollo Productivo.

Novara, L. (2012). *Flora del Valle de Lerma*. Herbario MSCN-FCN-Universidad Nacional de Salta

UNE-EN 13183-1. (2019). “Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada - Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa”. UNE Norma Española. 9 pp.

UNE-EN 408:2011 +A1:2012 (2012). “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”. UNE Norma Española. 37 pp.

UNE-EN 384:2016+A1. (2020). “Madera estructural - Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad”. UNE Norma Española. 23 pp.

7. ANEXOS

Anexo: Procesamiento de datos

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1JMqJG6hjf4dn3EcKMDQdeAh8EfaZecBS/edit?gid=334546701#gid=334546701>

Anexo: Curvas de elasticidad

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1CpsI-fo7Qy7RQQIEkMRIQDMKskJBpWa/edit?gid=1452995945#gid=1452995945>

Anexo: Probetas de relación de esbeltez 3:1

https://drive.google.com/drive/folders/1FwSqqrNhcl-bw3eOzQ-iZf_GjeAUqVDQ

Anexo: Probetas de relación de esbeltez 4:1

https://drive.google.com/drive/folders/12_HPj5X7wPtEJSnp_P-cvkFIHCWEEwc

Anexo: Probetas de relación de esbeltez 5:1

<https://drive.google.com/drive/folders/18D0vJex9KK9QeqWK2NxaWSbEPp7gLvSX>

Anexo: Probetas de relación de esbeltez 6:1

<https://drive.google.com/drive/folders/1uWy8XwzYCGrCo6-gjeYKpbUvd7oTUsRv>

8. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han formado parte de esta hermosa etapa de mi vida. En particular, agradecer a mi familia, que me ha enseñado a valorar y disfrutar de los momentos especiales que la vida nos regala, mientras me brindan el apoyo necesario para seguir mis pasiones y estudiar lo que realmente me motiva.

En segundo lugar, agradecer profundamente a amigos y compañeros, por todas esas noches y días que ayudaron a despejar la mente y seguir adelante. Por todas las alegrías compartidas, y las crisis abatidas.

En tercer lugar, y no menos importante, quiero agradecer a todas las personas que forman parte del LEMEJ, por estos tres años compartidos, durante los cuales aprendí innumerables cosas y tuve la oportunidad de realizar mi práctica profesional. En particular, agradezco a Miguel, Patricio y Ana Clara, con quienes compartí proyectos y conocimientos para el desarrollo de la PPS, así como los valiosos consejos y la orientación profesional que me brindaron.

Finalmente, quiero reconocer a aquellos que, con una palabra o una frase casual, nos impulsaron a dar un paso tras otro hasta llegar a donde estamos hoy. Gracias a todos ellos, esto fue posible.