

Revista Cubana de Ciencias Forestales

Volumen 13, número 2; 2025, mayo-agosto



Artículo original

Comportamiento mecánico de cinco especies no tradicionales para producción de muebles a partir de piezas conformadas: Relación con parámetros de encolado (viscosidad y consumo)

Mechanical behavior of five non-traditional species for furniture production from shaped parts: Relationship with gluing parameters (viscosity and consumption)

Comportamento mecânico de cinco espécies não tradicionais para produção de móveis a partir de peças moldadas: Relação com parâmetros de colagem (viscosidade e consumo)

Viviana Cruz Martínez^{1*}  Dayron Viera Quintero² , Daniel Álvarez Lazo³ 

¹Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca” Pinar del Río, Cuba.

*Autor para la correspondencia: viviana.cruz@upr.edu.cu

Recibido: 22/05/2025.

Aprobado: 21/06/2025

Publicado: 22/06/2025

RESUMEN

La industria del mueble enfrenta la necesidad de sustituir especies maderables tradicionales, sobreexplotadas, por otras con mayor disponibilidad. Este estudio tiene como objetivo identificar la especie de mejor comportamiento mecánico para la fabricación de muebles mediante piezas conformadas de chapas de madera, partiendo de la evaluación técnica de 5 especies provenientes de la EAF Macurijes en Pinar del Río y EAF Costa Sur en Artemisa. Se creó un método clasificatorio para identificar los factores más influyentes en el proceso de conformación, destacando el consumo de cola,



la viscosidad de la cola y la especie. Se analizaron 10 probetas por cada especie mediante ensayos normalizados (GOST) de compresión, flexión estática e hienda, procesadas en laboratorios del MICONS y la Universidad de Pinar Río, las cuales se compararon mediante la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis. *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S.Johnson se destacó con la mayor resistencia a compresión ($71,79 \pm 1,92$ MPa) y flexión ($101,92 \pm 3,2$ MPa), superando significativamente a las demás especies. Mediante modelos de superficie de respuesta (RSM) y el algoritmo L-BFGS-B, se optimizaron los parámetros de encolado, identificando como rangos óptimos 140-150 s/BZ4 para la viscosidad y 170-180 g/m² para el consumo de cola. Estos valores maximizan la resistencia mecánica y reducen derrames durante la conformación. Los resultados validan a *C. citriodora* como material óptimo para mobiliario de alto rendimiento, ofreciendo una alternativa sostenible a especies en riesgo.

Palabras clave: consumo de cola, *Corymbia citriodora*, resistencia mecánica, optimización, viscosidad.

ABSTRACT

The furniture industry faces the urgent need to replace traditional, overexploited timber species with others greater availability. The objective of this study is to identify the species with the best mechanical behavior for the manufacture of furniture using veneer shaped pieces, based on the technical evaluation of 5 species from EAF Macurijes in Pinar del Río and EAF Costa Sur in Artemisa. A classificatory method was created to identify the most influential factors in the shaping process, highlighting the glue consumption, glue viscosity and species. Ten specimens for each species were analyzed by means of standardized tests (GOST) of compression, static bending and splitting, processed in laboratories of the MICONS and the University of Pinar del Rio, which were compared by means of the non-parametric Kruskal-Wallis test. *Corymbia citriodora* stood out with the highest resistance to compression ($71,78 \pm 1,92$ MPa) and bending ($101,92 \pm 3,2$ MPa), significantly exceeding the other species. Using response surface models (RSM) and the L-BFSG-B algorithm, the gluing parameters were optimized, identifying 140-150 s/BZ4 for viscosity and 170-180 g/m² for glue consumption as optimal ranges. These values maximize mechanical strength and reduce spillage during shaping. The



results validate *C. citriodora* as an optimal material for high performance furniture, offering a sustainable alternative to species at risk.

Keywords: glue consumption, *Corymbia citriodora*, mechanical strength, optimization, viscosity.

RESUMO

A indústria moveleira enfrenta a necessidade de substituir espécies de madeira tradicionais e superexploradas por outras mais amplamente disponíveis. Este estudo tem como objetivo identificar as espécies com melhor desempenho mecânico para a fabricação de móveis utilizando peças de folheado moldadas. Este estudo baseia-se na avaliação técnica de cinco espécies provenientes do FEA Macurijes em Pinar del Río e do FEA Costa Sur em Artemisa. Um método de classificação foi desenvolvido para identificar os fatores mais influentes no processo de conformação, destacando o consumo de cola, a viscosidade da cola e a espécie. Dez corpos de prova de cada espécie foram analisados por meio de ensaios padronizados (GOST) de compressão, flexão estática e fendilhamento. Esses ensaios foram processados nos laboratórios do MICONS e da Universidade de Pinar Río. Esses ensaios foram comparados por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S.Johnson destacou-se com as maiores resistências à compressão ($71,79 \pm 1,92$ MPa) e à flexão ($101,92 \pm 3,2$ MPa), superando significativamente as demais espécies. Utilizando a modelagem de superfície de resposta (RSM) e o algoritmo L-BFGS-B, os parâmetros de colagem foram otimizados, identificando faixas ótimas de 140-150 s/BZ4 para viscosidade e 170-180 g/m² para consumo de cola. Esses valores maximizam a resistência mecânica e reduzem o derramamento durante a conformação. Os resultados validam *C. citriodora* como um material ideal para móveis de alto desempenho, oferecendo uma alternativa sustentável para espécies em risco.

Palavras-chave: consumo de cola, *Corymbia citriodora*, resistência mecânica, otimização, viscosidade.



INTRODUCCIÓN

La industria del mueble en Cuba enfrenta un desafío dual: satisfacer la demanda de materiales con propiedades mecánicas robustas y, al mismo tiempo, mitigar la sobreexplotación de especies maderables tradicionales como *Swietenia mahagoni* (L.) Jacq. y *Cedrela odorata* L., cuyas poblaciones disminuyen drásticamente (Valdés *et al.* 2022; 2014). Esta problemática ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles, entre las cuales destacan especies de rápido crecimiento como *Eucalyptus sp.* y *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret & Golfari, ampliamente disponibles en regiones como Pinar del Río y Artemisa (Valdés *et al.* 2022). Sin embargo, su adopción industrial requiere validar técnicamente su idoneidad para procesos avanzados, como la conformación de piezas curvado encoladas mediante chapas de madera, tecnología que combina versatilidad de diseño con eficiencia productiva (Panić, Nezirević y Hodžić 2016; Ramos 2014)

Estudios previos (Cordero, Álvarez y Estévez 2022) han evaluado propiedades básicas de estas especies, sin embargo no han caracterizado su desempeño variando parámetros tecnológicos específicos, como la viscosidad y el consumo de cola, factores que según Pizzi y Mittal (2003) determinan integridad estructural de las piezas. Esta omisión limita la capacidad de predecir el comportamiento real de los materiales en procesos industriales complejos, donde la interacción entre variables técnicas puede afectar significativamente la calidad final.

En la actualidad, se hace necesario el desarrollo de estudios que aborden estas limitaciones mediante un enfoque multidisciplinario que integre ensayos normalizados (normas GOST), métodos numéricos y estadísticos, modelos de superficie de respuesta y métodos de optimización no lineal, así como *el diseño de métodos de clasificación innovadores para jerarquizar variables clave*. Estas herramientas permitirán no solo evaluar parámetros críticos de manera sistemática y establecer relaciones cuantitativas entre variables tecnológicas y propiedades mecánicas, sino también integrar criterios cualitativos derivados de la experiencia de especialistas, mediante su transformación en índices jerárquicos clasificables, para una toma de decisiones fundamentada.



Para abordar esta problemática, la presente investigación tiene como objetivo identificar la especie no tradicional de mejor comportamiento mecánico para la fabricación de muebles mediante piezas conformadas de chapas de madera, partiendo de la evaluación técnica de 5 especies provenientes de la Empresa Agroforestal (EAF) Macurijes en Pinar del Río y EAF Costa Sur en Artemisa.

Este estudio contribuirá significativamente al sector de muebles en nuestro país, ya que permitirá seleccionar especies no tradicionales con óptimo desempeño mecánico para la fabricación de piezas conformadas, reduciendo la dependencia de especies cada vez más escasas. Además de establecer parámetros técnicos de encolado para trabajar con dichas especies de forma que se maximice su resistencia mecánica, así como la eficiencia productiva del proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica del área de estudio

La Empresa Agroforestal Macurije se localiza en la región más occidental de la provincia de Pinar del Río, abarcando parte de los municipios de Guane y Mantua. Limita al norte con el litoral costero desde la ensenada de Baja hasta la ensenada de Garnacha; al este con el municipio San Juan y Martínez, perteneciente a la Empresa Agroforestal Pinar del Río; al sur con el municipio Sandino, vinculado a la Empresa Agroforestal Guanacahabibes (EAF) y al sureste con el litoral del Golfo de México (Martínez *et al.* 2022).

La Empresa Agroforestal Costa Sur está ubicada al Oeste de la provincia de Artemisa, cuenta con patrimonio forestal en los 11 municipios. Limita al norte con el Océano Atlántico, al sur con el Mar Caribe, al este con la provincia de La Habana y al oeste con la provincia Pinar del Río (Valdés, Álvarez y Fernández 2021) (Figura 1).



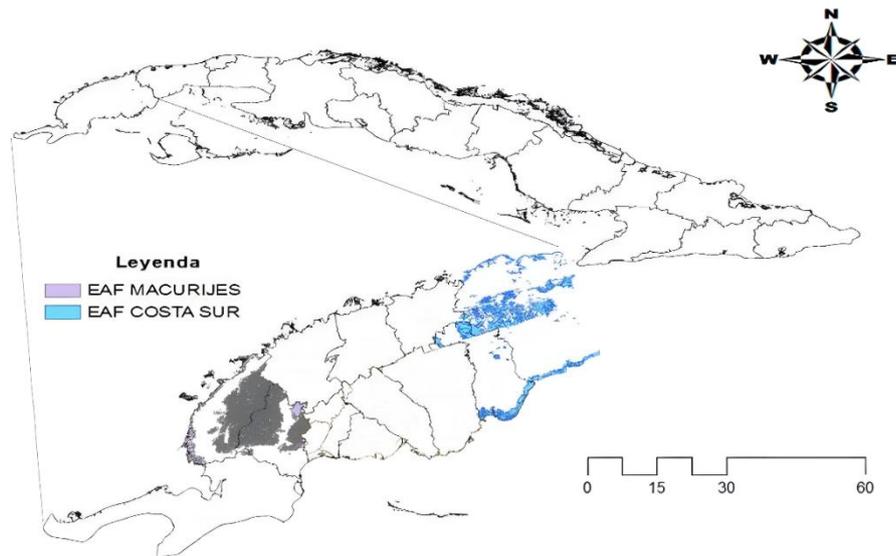


Figura 1. - Ubicación geográfica del área de estudio

Preparación previa

Para la elaboración de las chapas de madera, se tomaron 10 trozas de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret & Golfari, *Eucalyptus saligna* Sm., *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L.A.S.Johnson procedentes de la Empresa Agroforestal Macurije y 10 de *Bursera simaruba* (L.) Sarg. y *Cedrela odorata* L. de la Empresa Agroforestal Costa Sur; las cuales, se sometieron a una preparación hidrotérmica previa, con el objetivo de que la madera alcanzara una buena plasticidad, y así, facilitar los procesos de descortezado y debobinado de las láminas.

Este tratamiento hidrotérmico consistió en la aspersion con agua a temperatura ambiente, con rociadores que humedecen las trozas periódicamente durante 15 días, las cuales fueron procesadas en el Central Camilo Cienfuegos, ubicado en el municipio de Quivican, provincia de Mayabeque.

Determinación de los principales factores que influyen en el proceso de elaboración de piezas curvado encoladas

Para identificar los factores que influyen en el proceso de conformación de chapas de madera, se realizó una encuesta a especialistas de tecnología de la madera e investigadores forestales.



A los participantes se les presentó una lista de factores (Tabla 1) potencialmente relevantes para la resistencia de las piezas conformadas y se les propuso adjudicarle a cada factor un valor en un rango del 1 al 12, el cual caracteriza su papel en el proceso; siendo el valor 1 correspondiente al de mayor importancia y 12 al de menor.

Tabla 1. - Factores que influyen en el proceso de conformación de chapas de madera.

Notación	Factores
x_1	Especie
x_2	Rugosidad de la superficie
x_3	Consumo de cola
x_4	Viscosidad de la cola
x_5	Presión específica de la conformación
x_6	Temperatura de calentamiento de la superficie de molde
x_7	Humedad de las chapas de madera
x_8	Tiempo de exposición de encolado
x_9	Temperatura del medio ambiente
x_{10}	Tipo de cola
x_{11}	Grosor de la chapa
x_{12}	Método de encolado

Para analizar los resultados de la encuesta, se asumió que cada factor x_i ($i \in \mathbb{N}, 1 \leq i \leq 12$) está asociado a una función continua $f_i(e)$, la cual asigna a cada especialista $e = 1, 2, 3, \dots, 12$ el valor dado por él al factor x_i . Para cuantificar la importancia acumulada de cada factor, se integraron numéricamente estas funciones mediante el método de los trapecios (Sauer 2012), aprovechando la equidistancia entre los puntos ($h = 1$): Ecuación 1)

$$\int_1^{12} f_i(e) de \approx h \left(\frac{1}{2} f_i(e_1) + f_i(e_2) + \dots + f_i(e_{11}) + \frac{1}{2} f_i(e_{12}) \right) \quad (1)$$

Para agrupar los factores según su importancia se diseñó la siguiente función de umbralización (Ecuación 2 y 3):



$$d(m) = \begin{cases} 0, & m = 0 \\ 20 \sum_{i=1}^m (3 - i + 1), & m \neq 0 \end{cases}, \quad m = 0,1,2,3 \quad (2)$$

donde:

- m : número de clúster ($m = 0$ es un clúster vacío de referencia),
- $d(m)$: valor máximo permitido para los elementos del clúster m .

Luego, un factor x_i se asigna al clúster m , si cumple:

$$d(m - 1) \leq \int_1^{12} f_i(e) de < d(m) \quad (3)$$

El análisis de estos grupos de factores permitió elaborar la estrategia de los experimentos ulteriores.

Determinación de la resistencia mecánica de las piezas

Se emplearon probetas con forma de prisma rectangular según normas GOST 9623-87, GOST 9624-2009, GOST 9625-2013. Para cada especie se confeccionaron 5 bloques curvado encolados, de los cuales se procesaron 10 probetas por bloque para un total de 50 probetas por ensayo mecánico, siguiendo la metodología de Álvarez (1991), citada por Cordero, Álvarez y Estévez (2022). Las dimensiones de las probetas en los ensayos realizados fueron las siguientes:

- 1) Resistencia a la compresión: $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$
- 2) Resistencia a la flexión estática: $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$
- 3) Resistencia a la hienda: $15 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$

Durante los experimentos, realizados en los laboratorios del MICONS y de la Universidad de Pinar del Río, el tiempo de acción de la fuerza orientada y aplicada a la probeta, fue de 60 segundos y se mantuvieron constantes los siguientes factores experimentales:

- Humedad de las chapas: 6 %
- Temperatura de conformación: 90 °C



- Tiempo de conformación: 1 *min/mm* de grosor del paquete
- Tipo de cola: urea formaldehído
- Viscosidad de la resina: 140 *s/BZ4*
- Consumo de cola: 160 *g/m²*
- Catalizador: NH₄Cl₂ al 1 % de concentración
- Velocidad de endurecimiento de la cola a 90 °C: 75 *seg*

Para el análisis de la resistencia de las especies estudiadas, se utilizó la prueba estadística Kruskal-Wallis con corrección Dunn-Bonferroni, debido a que algunos de los datos no cumplían el supuesto de normalidad.

Optimización de parámetros tecnológicos en C. citriodora

Para la especie que exhibió la mayor resistencia mecánica (*C. citriodora*) en los ensayos anteriores, se implementó un diseño factorial completo de 3 niveles por factor ($3^2 = 9$), evaluando:

- Viscosidad de la cola: 60, 120, 180 *s/BZ4*
- Consumo de cola: 100, 180, 260 *g/m²*

Se generaron modelos de superficie de respuesta (RSM) de segundo orden para cada resistencia, normalizando las variables mediante escalado estándar (Myers, Montgomery y Anderson-Cook 2009; Montgomery 2013). La significación de los términos se validó con p-valores ($< 0,05$) y la bondad de ajuste se midió con R^2 y $R^2_{ajustado}$.

Para maximizar cada resistencia, se implementó el algoritmo de optimización no lineal L-BFGS-B con múltiples puntos iniciales para evitar la convergencia a óptimos locales. Los rangos de búsqueda se fijaron según los límites experimentales.

Finalmente, se integraron los modelos individuales en una función multiobjetivo ponderada, asignando pesos según la relevancia técnica de cada resistencia, definiendo una zona óptima de operación donde el desempeño combinado supera el 95 % del máximo teórico.



Herramientas computacionales

El análisis de datos se implementó en Python 3.9.6, utilizando las siguientes bibliotecas:

- SciPy: Para optimización numérica (método L-BFGS-B) y prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis.
- scikit-learn: Construcción de modelos de superficie de respuesta (RSM) con regresión polinómica.
- scikit-posthocs: Aplicación de pruebas no paramétricas post-hoc (Dunn-Bonferroni) tras resultados significativos en Kruskal-Wallis.
- statsmodels: Validación de significancia estadística mediante p-valores y cálculo de R^2 y $R_{ajustado}^2$ ajustado para los modelos.
- Matplotlib: Generación de gráficos 3D de superficies de respuesta y mapas de contorno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los principales factores que influyen en el proceso de elaboración de piezas curvado encoladas

El análisis de los resultados de la encuesta a partir de la Ecuación (1), la función definida en (2) y la relación (3), permitió clasificar los factores en tres clústeres según su impacto relativo en la resistencia mecánica, siendo el clúster I el de mayor influencia, y el III el de menor influencia

- I. $x_7, x_3, x_4, x_{10}, x_1, x_5$
- II. x_8, x_6, x_{12}
- III. x_2, x_{11}, x_9



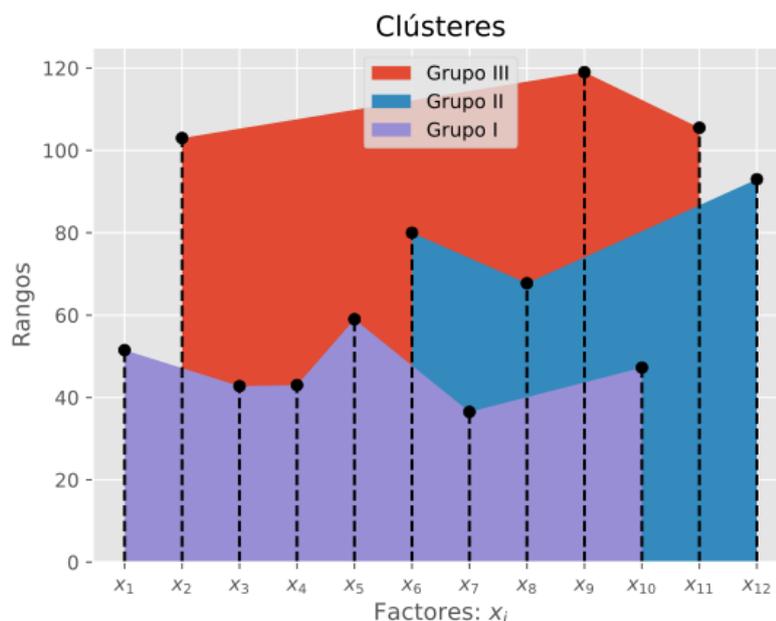


Figura 2. - Representación de los clústeres obtenidos para los factores x_i

Teniendo en cuenta los factores que conforman el clúster I, se decidió realizar el análisis de la resistencia mecánica de las piezas de varias especies para determinar cuál de ellas es la mejor opción, de forma que en el experimento general se tomará solo dicha especie (x_1).

Con la especie fijada, el experimento se centró en optimizar los parámetros tecnológicos consumo de cola (x_3) y viscosidad de la cola (x_4), dado su correlación y su papel en la resistencia de encolado. Los factores (x_5, x_7) se mantuvieron constantes en niveles estándar y se utilizó cola de urea formaldehído (x_{10}) por ser una de las más usadas.

Análisis de la resistencia mecánica de las piezas

Los resultados obtenidos (Tabla 2) indican que las especies analizadas cumplen con los requisitos mecánicos internacionales para la tecnología de chapas de madera curvado encoladas aplicadas a la industria del mueble. Las especies del género *Eucalyptus* destacaron significativamente, *Corymbia citriodora* registró la mayor resistencia a la compresión ($71,78 \pm 1,92$ MPa), seguida de *Eucalyptus saligna* ($70,62 \pm 1,28$ MPa), superando significativamente las demás especies estudiadas ($p < 0,0000$), coincidiendo con Cordero *et al.* (2022).



Tabla 2. - Comparación de los valores medios de la resistencia mecánica de las láminas de madera

Especie	Media \pm Desviación Estándar		
	Compresión (MPa)	Flexión estática (MPa)	Hienda (MPa)
<i>Pinus caribaea</i>	62,83 \pm 3,36 ^{ab}	71,41 \pm 2,96 ^c	0,34 \pm 0,05 ^{bc}
<i>Eucalyptus saligna</i>	70,62 \pm 1,28 ^a	99,30 \pm 1,50 ^{ab}	0,38 \pm 0,04 ^{ab}
<i>Corymbia citriodora</i>	71,78 \pm 1,92 ^a	101,92 \pm 3,20 ^a	0,39 \pm 0,03 ^a
<i>Bursera simaruba</i>	34,51 \pm 1,06 ^b	67,22 \pm 1,70 ^c	0,33 \pm 0,02 ^c
<i>Cedrela odorata</i>	37,39 \pm 1,70 ^b	98,30 \pm 3,34 ^{bc}	0,38 \pm 0,03 ^{ab}

Nota: Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La combinación de la alta resistencia a la flexión estática en *Corymbia citriodora* (101,92 \pm 3,20 MPa) y *Eucalyptus saligna* (99,30 \pm 1,50 MPa), junto con su desempeño en compresión, sugiere que estas especies son óptimas para componentes estructurales. Si bien Pupo *et al.* (2018) advierten sobre las tensiones de crecimiento en *Eucalyptus sp.* que provocan deformaciones durante el aserrado, el uso de chapas laminadas, como en este estudio y en Cordero Quintans *et al.* (2022), mitiga estos efectos al redistribuir las tensiones, maximizando su resistencia intrínseca.

En cuanto a la resistencia a la hienda, los resultados confirman que *Corymbia citriodora* (0,39 \pm 0,03 MPa) y *Cedrela odorata* (0,38 \pm 0,03 MPa) presentan una adhesión eficiente, crítica para la integridad estructural de piezas encoladas. Esto coincide con la observación hecha por Cordero *et al.* (2022) de que estas especies se encolan correctamente.

Resistencia de las piezas de Corymbia citriodora en función del consumo y la viscosidad de la cola

Los modelos normalizados de RSM para las resistencias a compresión (Γ_{comp}), flexión (Γ_{flex}) y hienda (Γ_{hienda}), descritos en las Ecuaciones (4), (5) y (6), mostraron un ajuste estadísticamente robusto, explicando más del 80% de la variabilidad de los datos. Todos los términos del modelo (lineales, cuadráticos y de interacción) fueron significativos ($p < 0,05$) evidenciando la influencia no lineal de la viscosidad y el consumo de cola,



coincidiendo con lo reportado por (Jerásio *et al.* 2021) en su estudio sobre adhesivos en *Eucalyptus sp.*

$$\Gamma_{comp} = 58,262 + 4,745x_3 + 3,672x_4 - 4,224x_3^2 - 2,950x_4^2 - 3,715x_3x_4 \quad (4)$$

$$\Gamma_{flex} = 106,672 - 0,624x_3 + 13,952x_4 - 12,895x_3^2 - 2,449x_4^2 - 5,236x_3x_4 \quad (5)$$

$$\Gamma_{hienda} = 0,408 - 0,006x_3 + 0,005x_4 - 0,044x_3^2 + 0,015x_4^2 - 0,029x_3x_4 \quad (6)$$

Jerásio *et al.* (2017) y Jerásio, *et al.* (2021) destacaron que la porosidad heterogénea del *Eucalyptus sp.* exige un equilibrio entre la penetración del adhesivo (favorecida por viscosidad baja-media) y la formación de una capa cohesiva (requiere consumo medio-alto). Nuestros modelos RSM ($R^2 > 0,8$) respaldan esta dualidad: la resistencia a la compresión se maximizó con viscosidad moderada (~ 135 s/BZ4) y alto consumo (~ 210 g/m²), mientras que la flexión requirió mayor viscosidad (~ 180 s/BZ4) para compensar un consumo reducido (~ 170 g/m²) (ver Figura 3, Tabla 3). Esta compensación refleja el dilema entre penetración y formación de líneas adhesivas continuas, descrito también en estudios con adhesivos fenólicos para maderas porosas.

Tabla 3. - Valores óptimos de viscosidad, consumo de cola y resistencia máxima obtenidos mediante RSM y L-BFGS-B.

	Viscosidad (s/ BZ4)	Consumo de cola (g/ m²)	Máximo de resistencia (MPa)
Γ_{comp}	135,4	209,5	59,91
Γ_{flex}	180,0	170,8	116,16
Γ_{hienda}	123,2	176,4	0,41

Según la Tabla 3, las resistencias máximas se alcanzan con viscosidad entre 120 – 180 s/BZ4 y con consumo de cola entre 170 – 210 g/m². Sin embargo, aplicar consumos superiores a 180 g/m² resulta poco factible técnicamente debido al derrame de cola al unir las chapas. Por ello, se propone incrementar la viscosidad y limitar el consumo a un máximo de 180 g/m² para optimizar el proceso, coincidiendo con las observaciones de Jerásio, *et al.* (2021) y Jerásio *et al.* (2017) en adhesivos estructurales aplicados a *Eucalyptus grandis* donde consumos > 200 g/m² generaron estrés interno por exceso de material polimérico.



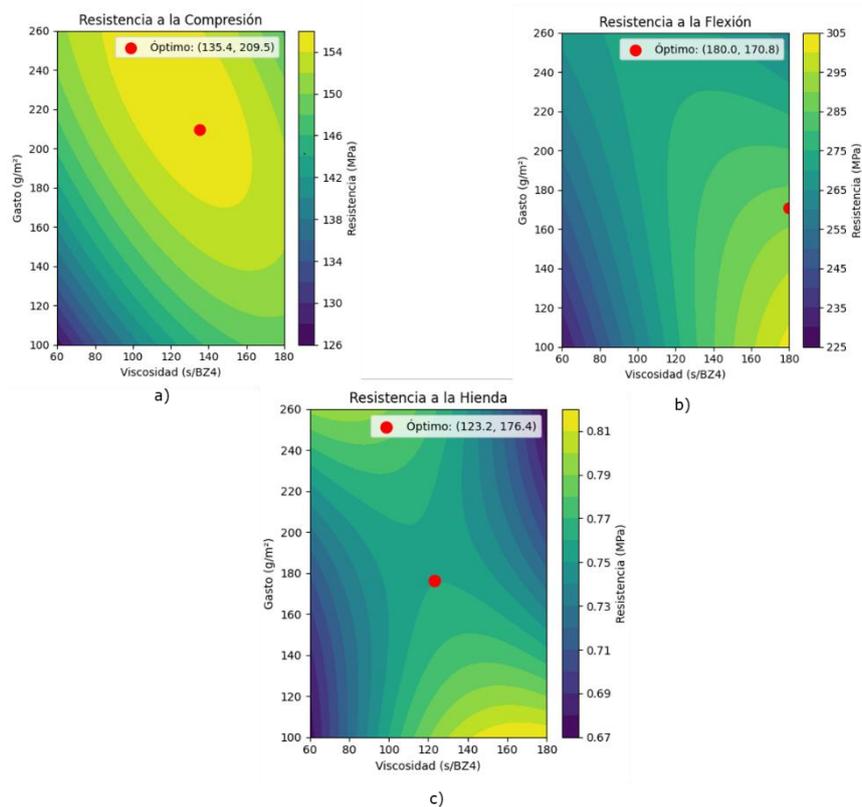


Figura 3. - Curvas de nivel de las superficies de respuesta para resistencia a la compresión a), a la flexión b) y a la hienda c) con indicación de los puntos óptimos

La optimización ponderada (20 % compresión, 40 % flexión, 40 % hienda) identificó un punto de equilibrio en $x_3 = 180,0 \text{ g/m}^2$ y $x_4 = 147,7 \text{ s/BZ4}$, alcanzando el 92 % del desempeño combinado máximo (Figura 4). Por lo que se recomienda como zona operativa, la región dentro de los rangos:

- Consumo de cola: 170 – 180 g/m^2
- Viscosidad de la cola: 140 – 155 s/BZ4

Esta región equilibra eficiencia técnica y robustez operativa, garantizando para la resistencia a la compresión más del 85 % del máximo teórico, y para la resistencia a la flexión y a la hienda más del 90 % del máximo teórico.



La discrepancia entre los óptimos individuales (Tabla 3) y la solución ponderada (Figura 4) revela que la selección de parámetros depende de la aplicación final. Por ejemplo, en elementos estructurales donde la flexión es crítica (40% de peso en la optimización), aumentar la viscosidad a 180 s/BZ4 compensa la reducción de consumo, alineándose con las conclusiones de Jerásio, *et al.* (2021) para uniones sometidas a cargas dinámicas.

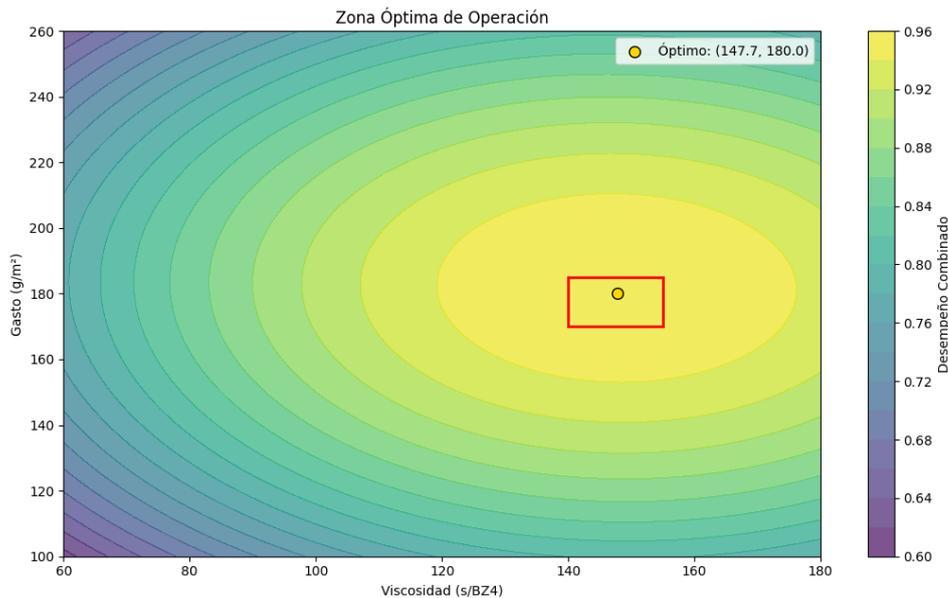


Figura 4. - Mapa de desempeño combinado y zona óptima de operación.

Esta región no solo maximiza las resistencias a compresión, flexión y hienda, sino que también mitiga derrames de cola durante la compactación, optimizando costos y eficiencia operativa.

La operación dentro de estos rangos garantiza un equilibrio entre robustez técnica y rentabilidad. Adicionalmente el uso de *Corymbia citriodora*, especie de rápido crecimiento, alinea el proceso con criterios de sostenibilidad, promoviendo la sustitución de maderas tradicionales en riesgo de sobreexplotación.

CONCLUSIONES

El consumo de cola, viscosidad de la cola y la especie (en ese orden de influencia), determinan la calidad final de las piezas conformadas.



Corymbia citriodora se posiciona como la opción preferente para mobiliario de alto rendimiento, debido a su superior resistencia mecánica.

El desempeño mecánico máximo de las piezas conformadas de chapas de madera de *Corymbia citriodora* se alcanzan para una viscosidad de 140 – 155 s/BZ4 y un consumo de cola de 170 – 180 g/m², por lo que se recomienda operar dentro de estos rangos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORDERO, B.A., ÁLVAREZ, D. y ESTÉVEZ, I., 2022. Análisis del proceso de elaboración de muebles de piezas curvadas de chapas de madera. Avances [en línea], vol. 24, no. 3, pp. 285-297. [consulta: 28 abril 2025]. ISSN 1562-3297. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8950575>.

JERÁSIO, J., MENDES, A.P., SILVA, J.P., OLIVEIRA, A.D.C., OLIVEIRA, R.V. y MARIUS, R., 2017. Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. Floresta e Ambiente [en línea], vol. 24, [consulta: 20 mayo 2025]. ISSN 2179-8087. DOI 10.1590/2179-8087.077114. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-80872017000100169&lng=pt&tlng=pt.

JERÁSIO, J., OLIVEIRA, A.D.C., VITAL, B., GEIKE DE ANDRADE, B., GOMES, R.M., DE OLIVEIRA, S. y COSTA DE SOUZA, E., 2021. Improving the understanding of wood bonding: Behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood. International Journal of Adhesion and Adhesives [en línea], vol. 112, [consulta: 20 mayo 2025]. ISSN 0143-7496. DOI 10.1016/j.ijadhadh.2021.102987. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/354632211_Improving_the_understanding_of_wood_bonding_Behavior_of_different_adhesives_on_the_surface_of_eucalyptus_and_pine_wood.



MARTÍNEZ, J.L., ÁLVAREZ, D.A., CÁNDANO, F., FERNÁNDEZ, R.R. y DÍAZ, A., 2022. Análisis de los costos y evaluación financiera como herramienta para la toma de decisiones en el aprovechamiento forestal. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* [en línea], vol. 10, no. 2, pp. 215-229. [consulta: 29 abril 2025]. ISSN 2310-3469. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2310-34692022000200215&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

GOST 2009. Method for determination of shear strength. Standard. Moscú, Rusia: USSR State Committee for Standards. Glued laminated timber, GOST 9624-2009.

GOST 1987. Method for determination of ultimate strength and modulus of elasticity in compression. Standard. Moscú, Rusia: USSR State Committee for Standards. Laminated glued wood, GOST 9623-87.

GOST 2013. Methods for determination of strength and modulus of elasticity in static bending. Standard. Moscú, Rusia: USSR State Committee for Standards. Glued laminated timber, GOST 9625-2013.

MONTGOMERY, D.C., 2013. *Design and Analysis of Experiments* [en línea]. 9th. S.l.: Wiley. [consulta: 13 mayo 2025]. ISBN 978-1-118-14692-7. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/361342853_Design_and_Analysis_of_Experiments.

MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C. y ANDERSON-COOK, C.M., 2009. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 3rd. S.l.: Wiley. ISBN 978-0-470-17446-3.

PANIĆ, L., NEZIREVIĆ, E. y HODŽIĆ, A., 2016. Modern and sophisticated processes of 3D veneer plywood bending. *Bulletin of Engineering* [en línea], vol. IX, no. 2, pp. 45-48. [consulta: 1 marzo 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331258116_MODERN_AND_SOPHISTICATED_PROCESSES_OF_3D_VENEER_PLYWOOD_BENDING.



- PIZZI, A. y MITTAL, K.L., 2003. Handbook of adhesive technology. 2nd ed., rev.expanded. New York: M. Dekker. ISBN 978-0-8247-0986-0. TP968 .H347 2003
- PUPO, I., ÁLVAREZ, D., MOREJON, R., ESTEVES, I. y PRIETO, L., 2018. Tratamientos para reducir los índices de rajaduras. Revista Cubana de Ciencias Forestales [en línea], vol. 6, no. 3, pp. 260-271. Disponible en: <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/346/>.
- RAMOS, B.P.F., 2014. Metodologia de curvatura de bambu laminado colado (BLAC) para fabricação de mobiliário: diretrizes para o design [en línea]. Bauru: Dissertação mestrado - Universidade Estadual Paulista «Julio de Mesquita Filho», Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação. Disponible en: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/e5844c3c-5adc-43a7-b56f-c636a2b35020>. T/UNESP R141m 2.708
- SAUER, T., 2012. Numerical Analysis. 2nd. Boston: Pearson Education Inc. ISBN 978-0-321-78367-7.
- VALDÉS, R.H., ÁLVAREZ, D. y FERNÁNDEZ, R.R., 2021. Análisis de la calidad superficial de diferentes maderas. Avances [en línea], vol. 23, no. 2, pp. 163-174. [consulta: 29 abril 2025]. ISSN 1562-3297. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7925355>.
- VALDÉS, R.H., LAZO, D.A., FERNÁNDEZ, R.R., ACOSTA, A. y GARCIA, N.S., 2022. Análisis de las preferencias de madera para la producción de muebles en Pinar del Río y Artemisa, Cuba. Revista Cubana de Ciencias Forestales [en línea], vol. 10, no. 2, pp. 244-261. [consulta: 30 abril 2025]. ISSN 2310-3469. Disponible en: <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/755>.
- VALDÉS, R.H., RAMÍREZ, A., FERNÁNDEZ, R.R., ÁLVAREZ, Danaysi, ÁLVAREZ, Daniel, GONZÁLEZ, I. y PEÑALVER, A., 2014. Análisis de utilización de diferentes especies maderables en la elaboración de artículos de alta demanda en el mercado de EFI Sierra Cristal perteneciente a la provincia Santiago de Cuba. Revista Forestal Baracoa [en línea], vol. 33, no. Número Especial, pp. 14-23. [consulta: 1 marzo 2025]. Disponible en:



[https://www.academia.edu/20139356/ANALISIS_DE_LA_UTILIZACION_D
E_DIFERENTES_ESPECIES_MADERABLES_EN_LA_ELABORACION.](https://www.academia.edu/20139356/ANALISIS_DE_LA_UTILIZACION_DE_DIFERENTES_ESPECIES_MADERABLES_EN_LA_ELABORACION)

Conflictos de intereses:

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Los autores han participado en la redacción del trabajo y análisis de los documentos.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial
4.0 Internacional.

