

Volumen 30 N° 2. Agosto, 2024

ISSN 0718-4646



CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL



**INSTITUTO FORESTAL
CHILE**





<https://revista.infor.cl>



REVISTA CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL. INSTITUTO FORESTAL. CHILE

La revista Ciencia & Investigación Forestal es una publicación científico técnica, en español, publicada por el Instituto Forestal desde el año 1987. Es una publicación de acceso abierto, seriada, arbitrada, en formato digital y de carácter interdisciplinario.

En la Revista se divulga la investigación y ciencia forestal con una visión aplicada y orientada principalmente a profesionales y técnicos del sector forestal que demandan soluciones para sus problemas en el corto y mediano plazo, así como a profesionales del sector público y privado, investigadores, académicos, personeros con responsabilidad en la toma de decisiones técnico-políticas, y en general a la sociedad interesada en el conocimiento de los múltiples bienes y servicios que proveen los ecosistemas forestales.

Ciencia & Investigación Forestal publica contribuciones originales e inéditas de investigadores y profesionales, de instituciones nacionales o extranjeras, interesados en publicar investigación aplicada en el ámbito de las ciencias forestales y materias afines en las temáticas económicas, sociales y ambientales.

Todas las contribuciones presentadas a la revista son sometidas a un proceso de revisión por pares (*peer review*) bajo la modalidad de doble ciego.

La periodicidad de publicación es de tres números por año y ocasionalmente números especiales.

La Revista provee acceso libre a su contenido bajo el principio de hacer disponible la investigación al público para fomentar un mayor intercambio de conocimiento global. No existe costo por acceso a las contribuciones publicadas y los autores no asumen ningún costo por el procesamiento, revisión, edición y publicación de sus contribuciones.

En el sitio Web de la Revista (<https://revista.infor.cl>) es posible acceder a todos los números publicados y también encontrar toda la información referente a Equipo Editorial, Propiedad Intelectual, Declaración de Privacidad, Tipo de Contribuciones y la Guía y Recomendaciones para Autores. Se trata de una plataforma OJS (*Open Journal System*) en la cual, además de la información indicada, radica el manejo del flujo editorial de la Revista. Los autores deben a través de esta plataforma incorporar sus contribuciones, recibir posibles sugerencias de correcciones y finalmente enterarse de la aceptación o eventual rechazo de estas.

Santiago Barros & Braulio Gutiérrez
Editores C&I Forestal
sbarros@infor.cl [bgutierr@infor.cl](mailto:bgutierrez@infor.cl)



CONTENIDO

ARTÍCULOS

Comportamiento de las importaciones de pellets de madera en Chile durante los últimos 10 años. 5

Juan Pinilla Suárez; Felipe Navarrete Ulloa; Joaquín García Inostroza; Mauricio Navarrete Torres; Karoline Casanova del Río & Karina Luengo Vergara.

Análisis de prueba de concepto del modelo red neuronal para detección de cambios en coberturas de plantaciones. 21

Felipe Guzmán Vargas; Catalina Zumaeta Guzmán; Carlos Bahamondez Villarroel; Rodrigo Sagardía Parga & Carlos Buchner Asenjo.

APUNTES

Bacterias y semillas: Una apremiada relación mutualista en el trópico. 33

Alexis Domínguez-Liévano; Anne Ashby Damon & Arnoldo Wong Villarreal.

Micropropagación de raulí: Una alternativa viable y apropiada para la producción comercial. 39

Roberto Ipinza Carmona; Ana Sabja Giacaman; Braulio Gutiérrez Caro & María Molina Brand.

Simposio Migración asistida de *Araucaria araucana*: Causas, acciones y perspectivas futuras. 45

Roberto Ipinza Carmona & Santiago Barros Asenjo.



ARTÍCULO

Comportamiento de las importaciones de pellet de madera en Chile durante los últimos 10 años.

Juan Pinilla Suárez¹; Felipe Navarrete Ulloa¹; Joaquín García Inostroza¹; Mauricio Navarrete Torres¹; Karoline Casanova del Río¹ & Karina Luengo Vergara¹.

¹ Instituto Forestal, sede Biobío, Chile. jpilla@infor.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.609>

Recibido: 04.07.2024; Aceptado 22.07.2024.

RESUMEN

La industria del pellet en Chile contribuye a la diversificación de la matriz energética y a la reducción de la contaminación ambiental, pero enfrenta desafíos relacionados con la disponibilidad y calidad de la materia prima, así como la necesidad de normativas estrictas y obligatorias que aseguren la calidad del producto. El crecimiento del número de plantas productoras de pellet, derivado del aumento de la demanda de este biocombustible, originada por programas de fomento al recambio de calefactores y cambios culturales en el consumidor, ha requerido de una adecuada disponibilidad de biomasa forestal, tanto en calidad como en cantidad, evidenciándose episodios de puntuales de escasez que han afectado su disponibilidad en el país. Para minimizar esos episodios de escasez se están desarrollando diversas iniciativas abordadas en la Mesa de pellet desarrollada por el Ministerio de Energía durante el año 2023, de modo de favorecer al consumidor. Entre ellas se incluye el monitorear las importaciones de pellet, de manera de asegurar el abastecimiento, siendo de interés para productores, usuarios y entidades relacionadas, disponer de información del pellet que ingreso al país durante el último año. Por lo mismo, se realizó una búsqueda de antecedentes de los niveles de importación de pellet en el país durante el año 2023, analizando su tendencia y estacionalidad como serie de tiempo. Los resultados del análisis señalan que, durante el año 2023, la cifra de importación fue de 13.699 toneladas, representando el 84,6% del total de pellet ingresados al país desde el año 2014 al 2023. Respecto de la estacionalidad, los análisis iniciales señalan que las fluctuaciones se repiten a través del tiempo, con meses específicos donde el comportamiento de los valores de importación se repite de manera anual.

Palabras clave: Pellet, Energía, Biomasa, Importación, Serie de tiempo, Tendencia, Estacionalidad

SUMMARY

The pellet industry in Chile contributes to the diversification of the energy matrix and the reduction of environmental pollution, facing challenges related to the availability and quality of raw materials, as well as the need for strict and mandatory regulations that ensure product quality. The growth in the number of pellet producing plants derived from the increase in demand for this biofuel caused by programs to promote the replacement of heaters and cultural changes in the consumer, has required adequate availability of forest biomass, both in quality and quantity. , with specific episodes of pellet shortages in certain situations, affecting the availability of this Biofuel at the country level. To minimize the risks of shortage of this biofuel, various initiatives are being developed, addressed in the pellet Table developed by the Ministry of Energy during 2023 in order to benefit the consumer. This also includes monitoring pellet imports, in order to ensure supply, so it is of interest to producers, users and related entities to have information on the pellet that entered the country during the last year. For this reason, a background search was carried out on the import levels of pellet in the country during the year 2023, analyzing its trend and seasonality as a time series. The results of the analysis indicate that, during the year 2023, the pellet import figure was 13,699,032 kilograms, representing 84.6% of the total kilos of pellet imported into the country from 2014 to 2023. Regarding the seasonality, initial analyzes indicate that fluctuations are repeated over time, with specific months where the behavior of import values is repeated annually.

Key words: Pellet, Energy, Biomass, Import, Time series, Trend, Seasonality

INTRODUCCIÓN

El pellet es un producto energético eficiente, que contribuye a diversificar la matriz energética del país y que presenta bajas emisiones, que no incrementan la contaminación ambiental, polución atribuible principalmente al uso de la leña húmeda.

La producción de pellet es una industria reciente, donde en los últimos años han surgido empresas productoras entre las regiones de Valparaíso y Aysén, evidenciado el aumento de la demanda por este biocombustible. Su desarrollo deriva de programas de fomento al recambio de calefactores y cambios culturales en el consumidor, lo que se refleja en el aumento de las tasas de producción y ventas anual de este producto.

El crecimiento del sector ha requerido de una adecuada disponibilidad de biomasa forestal como materia prima para la industria del pellet. Ello ha significado que en los últimos años el sector enfrentase episodios de escasez de biomasa forestal para fabricar el pellet, lo que afecta a la disponibilidad de este biocombustible a nivel país.

La industria del pellet en Chile tiene un gran potencial para contribuir a la diversificación de la matriz energética y la reducción de la contaminación ambiental. Sin embargo, enfrenta desafíos significativos relacionados con la disponibilidad y calidad de la materia prima, así como la necesidad de normativas estrictas y obligatorias que aseguren la calidad del producto. El desarrollo de políticas públicas y la colaboración entre el sector privado y el gobierno serán clave para superar estos desafíos y fomentar el crecimiento sostenible de la industria del pellet (Pinilla *et al.*, 2022).

Por lo anterior, se están desarrollando distintas iniciativas para minimizar esta falta de materia prima de calidad adecuada (seca, limpia), de tal modo de que las plantas productoras puedan producir la cantidad suficiente para que los usuarios satisfagan sus requerimientos, evitando problemas de abastecimiento, y minimizando el daño de imagen al sector.

Entre tales iniciativas se considera la importación de pellet, como una forma de asegurar que se disponga de la cantidad requerida de este energético y favorecer su consumo y comercialización en Chile. En este contexto, la información de ingresos y países desde donde procede el pellet importado es de interés para los productores e interesados en comercializar pellet en el país, así como para el desarrollo de políticas públicas y para la regulación del sector, permitiendo tomar decisiones basadas en datos sobre requisitos, aranceles y normativas que favorezcan el desarrollo sostenible del mercado de este combustible.

Contar con estadísticas precisas de las importaciones de pellet es esencial para varios aspectos críticos de la industria y la política energética en Chile. Primero, esta información debe ser parte de la planificación y acciones para asegurar un suministro constante y suficiente para satisfacer la demanda interna, especialmente en períodos de alta demanda, o cuando la producción local no es suficiente. Además, las estadísticas de importación son cruciales para comprender la dinámica del mercado de pellets, identificar tendencias y ajustar las estrategias de producción y comercialización en consecuencia. Por lo mismo, en este documento se recopila y presentan antecedentes sobre el nivel de importaciones de pellet de madera durante el año 2023, analizando su comportamiento y componentes de tendencia y estacionalidad durante los últimos 10 años, para disponer de un insumo para políticas públicas, sector productivo y también como información para futuros procesos de estimación y desarrollo de modelos de disponibilidad.

ANTECEDENTES PRELIMINARES

La industria del pellet ha presentado un crecimiento constante los últimos años, con tasas superiores al 20% anual, siendo una opción de reemplazo en el uso de la leña o combustibles fósiles, por ser un producto energético de alta eficiencia térmica y por emitir menores emisiones contaminantes al medio ambiente (Pinilla *et al.*, 2022). Este aumento en la producción y consumo de pellet está alineado con la política energética chilena, que fomenta el uso de energías renovables y que se refleja en la Agenda de Energía (Ministerio de Energía, 2022), la que plantea la necesidad de contar con una “Matriz Energética Limpia”, y

que se debe trabajar por una matriz de calefacción limpia, promoviendo el uso de biomasa moderna en el sector residencial, como la leña seca y el pellet, impulsando el uso de energías limpias para abastecer los servicios energéticos que requieren los hogares. Ello requiere de la modernización del mercado, trazando un camino progresivo de transición hacia fuentes de calefacción más limpias, apoyado por una nueva regulación para el uso exclusivo de leña seca o pellet como energéticos menos contaminantes, y que se implementará gradualmente.

Adicionalmente, y relacionado con aspectos de polución en las ciudades, hoy en día existen planes de descontaminación ambiental, gestionado por el Ministerio de Medio Ambiente, en donde se promueve el cambio de calefactores a leña, principalmente, por calefactores que utilizan combustibles más amigables, como el pellet de madera, que presenta ventajas en comparación con la leña en cuanto a comodidad de uso y menores emisiones, asociado, además, a cambios culturales en la población (Pinilla *et al.*, 2022).

La Mesa Nacional del Pellet (Ministerio de Energía, 2023) concluyó su trabajo el año 2023 sugiriendo implementar acciones en el corto plazo para evitar la estrechez en el suministro de pellet, una propuesta para desarrollar el sector en el mediano y largo plazo, y un paquete de medidas con eje en la producción, la certificación y la disponibilidad de información tanto para productores como para consumidores de dicho combustible. Este trabajo señaló la necesidad de priorizar brechas relevantes al momento de asegurar la disponibilidad de este Biocombustible en el mercado, y con ello, el bienestar de los usuarios, centrandose una de ellas en información sobre oferta y consumo de pellet y metodologías para la estimación y proyección de demanda y oferta de pellet, entre otros.

En cuanto a producción, la región del Biobío es la principal productora de pellet en Chile. Durante el año 2023, esta región concentró el 33% del número de plantas productoras de pellet y el 70% de la producción de este biocombustible; en ella se presenta también la mayor concentración de la industria del aserrío y remanufactura a nivel nacional (Pinilla *et al.*, 2024).

La dependencia de los subproductos del aserrío presenta un desafío significativo para la industria del pellet en Chile, en donde se requerirá de un monitoreo constante de la disponibilidad de biomasa como materia prima y un desarrollo de políticas que aseguren el abastecimiento y calidad de este biocombustible. Actualmente, la industria del pellet depende completamente de los subproductos del aserrío, y cualquier disminución en la disponibilidad de estos subproductos afecta directamente la producción de pellets (Pinilla *et al.*, 2022).

En relación con la calidad del pellet, recientemente se aprobó la Ley N° 21.499 de Biocombustibles del Ministerio de Energía, la que regula la producción y comercialización de los biocombustibles sólidos, e incluye la futura necesidad de certificación de la calidad del pellet que se comercialice en el país.

En Chile, las normas para la caracterización y clasificación del pellet son voluntarias y las dicta la Norma Chilena NCh ISO 17225-2: 2017 (INN, 2017), que está basada en normas internacionales como la ISO 17.225. La normativa chilena permite la producción de pellets de distintas calidades, A1, A2 y B para el sector comercial, y las calidades I1, I2 e I3 para el sector industrial. Estas clasificaciones dependen del origen de la biomasa y el tratamiento químico.

La calidad del pellet está definida por diversos parámetros, como la humedad, contenido de cenizas, poder calorífico, durabilidad mecánica, entre otros. En Chile, la normativa NCh-ISO 17.225 establece las especificaciones técnicas que deben cumplir los pellets para ser considerados de calidad. Aunque estas normas son voluntarias, muchas empresas productoras las adoptan para asegurar un producto homogéneo y competitivo en el mercado.

MATERIAL Y MÉTODO

Se recopiló información de importaciones de pellet, mediante la revisión del sitio web del Servicio Nacional de Aduanas (<https://www.aduana.cl/aduana/site/edic/base/port/inicio.html>), desde donde se obtuvo el

código aduanero asociado a “pellets de madera”, y la información respecto a kilogramos y montos CIF en dólares de las importaciones de pellet realizadas en el país.

La base de datos fue procesada para analizar las siguientes variables:

- Importación anual de pellets
- Importación mensual histórica de pellets
- Importación de pellets durante el año 2023

Para analizar el comportamiento de las importaciones mensuales históricas, se considera la base de datos obtenida como una serie de tiempo, la cual fue descompuesta para su análisis. Descomponer una serie de tiempo de manera manual implica separar la serie en sus componentes principales: tendencia, estacionalidad y residuo (Box *et al.*, 2015).

La tendencia representa el componente a largo plazo de la serie de tiempo. Para identificar la tendencia, se puede usar un método de suavizado como el promedio móvil (Ecuación 1) (Hyndman & Athanasopoulos, 2018).

$$T_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} Y_{t-i} \quad (1)$$

Donde,

T_t : Valor de la tendencia en el tiempo t .

Y_t : Valor original de la serie en el tiempo t .

N : Número de muestras que se utilizan para realizar los promedios.

Después de calcular la tendencia, es posible determinar la estacionalidad. La estacionalidad representa patrones repetitivos a corto plazo. Para identificarla, se eliminan los efectos de la tendencia y se calculan los índices estacionales. Para esto, primero se debe desestacionalizar la serie (Ecuación 2) (Hyndman & Athanasopoulos, 2018), y luego, agrupar los valores desestacionalizados por periodo y calcular el promedio para cada periodo (Ecuación 3) (Chatfield, 2003).

$$S_t = Y_t - T_t \quad (2)$$

Donde,

S_t : Serie desestacionalizada.

Y_t : Serie original.

T_t : Tendencia estimada.

$$I_m = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k S_{m+i} \quad (3)$$

Donde,

I_m : Índice estacional para el mes m .

k : Número de años en la serie.

Finalmente, una vez estimada la tendencia y la estacionalidad es posible calcular el residuo, correspondiente a lo que queda después de eliminar la tendencia y la estacionalidad de la serie original (Makridakis *et al.*, 1998) y representa la parte de la serie que no puede ser explicada por estos componentes (Ecuación 4).

$$R_t = Y_t - T_t - S_t \quad (4)$$

Donde,

- R_t: Residuo de la serie de tiempo.
- Y_t: Serie original.
- T_t: Tendencia estimada.
- S_t: Serie desestacionalizada.

Para evaluar el residuo, se utilizan propiedades indicadoras del proceso de modelación de la serie de tiempo (Brockwell & Davis, 2016):

- Media Cero: El residuo debe tener una media cercana a cero. Para determinar esto se calcula la relación entre la media y la desviación estándar de los residuos, si el valor obtenido es menor al 10%, se considera que la media es cercana a 0.
- Normalidad de los residuos: El residuo debe tener una distribución parecida a la normal, determinada a través de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS).
- No Correlación: No debe haber patrones significativos o correlaciones entre los valores residuales a lo largo del tiempo. Para determinar si existe correlación de los residuos, es necesario aplicar la prueba de Durbin Watson (DW).
- Distribución Constante: La varianza del residuo debe ser constante a lo largo del tiempo, sin presentar tendencias de heterocedasticidad (cambio en la varianza). Para analizar la heterocedasticidad de los residuos, se aplica la prueba de White (W).

En el **Cuadro 1** se presenta la lista de las pruebas estadísticas que se aplicarán, la ecuación para calcular el estadígrafo y las referencias del método.

Cuadro 1. Pruebas estadísticas utilizadas.

Prueba estadística	Determinación	Ecuación del indicador	Variables	Fuente
Kolmogorov-Smirnov	Normalidad de residuos	$D = \text{MAX}_x * F_n(X) - F(X) $	D: Estadígrafo de prueba. MAXx: valor mínimo de las diferencias absolutas. F _n (X): Función de distribución empírica de la muestra. F(X): Función de distribución acumulativa teórica de la distribución de referencia	Hollander & Wolfe, 1999
Durbin-Watson	No correlación de los residuos	$DW = \sum (e_t - e_{t-1})^2 / \sum e_t^2$	DW: Estadígrafo de prueba. e _t : Residuo en el tiempo t T: Número total de observaciones	Durbin & Watson, 1950
White	Homocedasticidad	$W = n * R^2$	n: Número de observaciones R ² : Coeficiente de determinación de la regresión	White, 1980

Para evaluar los estadígrafos de las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y White se utiliza la estimación del *p-value*. El *p-value* es una medida que ayuda a decidir si rechazar o no la hipótesis nula (Fisher, 1925). Un *p-value* bajo (generalmente ≤ 0.05) indica que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, sugiriendo que los resultados observados son poco probables bajo la suposición de que la hipótesis nula es cierta. Por otro lado, un *p-value* alto indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula.

RESULTADOS

Importación Anual de Pellets de Madera

El Servicio Nacional de Aduana registra la cantidad y monto de importaciones de todos los productos del país. En el caso del pellet, Aduanas dispone de un código arancelario para la identificación del pellet de madera (**Cuadro 2**). Las importaciones anuales de este producto, durante los últimos diez años, tanto en cantidad (Toneladas), como en valor CIF (costo de mercancía, seguro y flete en miles de dólares) se resume en el **Cuadro 3**.

Cuadro 2. Código arancelario para pellets de madera.

Capítulo	Partida	SA	Glosa referencial
44	4401	44013300	«pellets» de madera

(Fuente: <https://www.aduana.cl> › artic › asocfile › 2018_importaciones_por_producto)

Cuadro 3. Importaciones anuales de pellet de madera en el periodo 2014-2023.

Año	Cantidad (Ton)	Valor (Miles US\$ CIF)
2014	1.070,89	337,93
2015	195,93	88,96
2016	37,79	34,37
2017	37,73	78,24
2018	1.404,72	594,63
2019	6,52	33,28
2020	173,42	58,63
2021	499,20	179,80
2022	366,69	147,59
2023	13.699,03	4.309,93

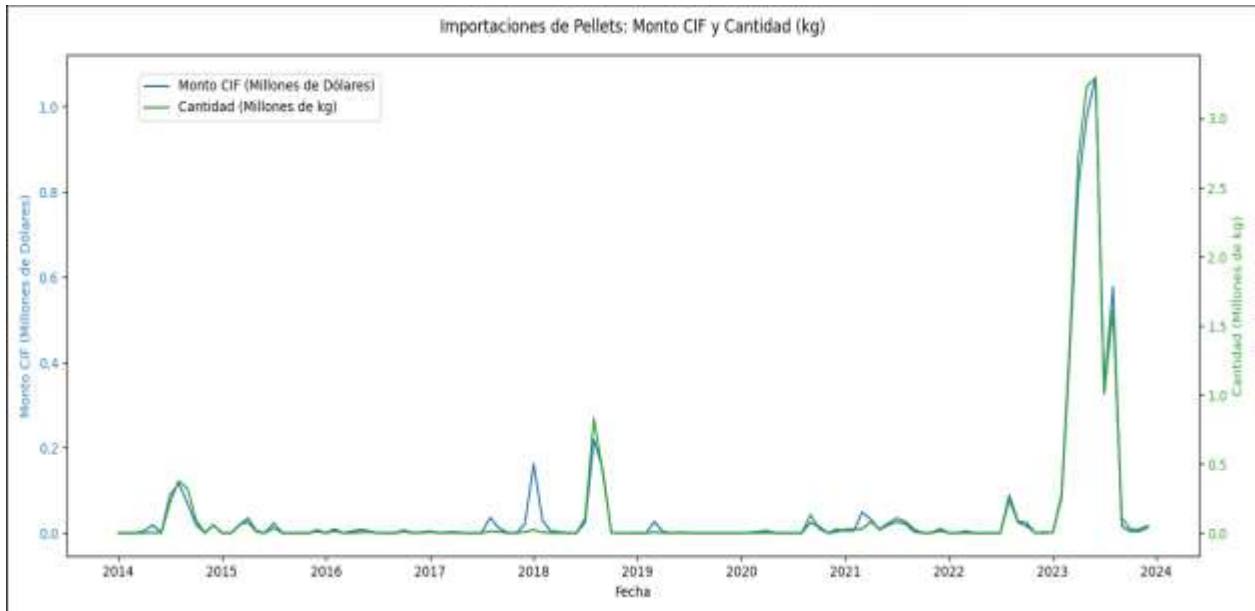
(Fuente: Declaraciones de Ingreso (DIN); Importaciones a título definitivo ajustadas con sus documentos modificatorios. Servicio Nacional de Aduanas).

Existe un enorme incremento de importación de pellets de madera durante el año 2023, cuando se totalizaron casi 13.700 toneladas, en circunstancias que la importación total de los 9 años anteriores (2014 a 2022) fue inferior a 3.800 toneladas, con un promedio anual de solo 421 ton/año. Es muy probable que este efecto sea consecuencia de la escasez de pellets experimentada el año 2022, que habría motivado a comercializadores a importar pellets para participar de un mercado insatisfecho y en crecimiento. Antes del año 2023 hubo dos años con importaciones superiores a las mil toneladas, 2014 y 2018, con excepción de estos años, las importaciones mantuvieron cifras bajas que varían entre 6 y 500 toneladas anuales.

Durante el año 2023 se observa un total de 13.699 toneladas de pellet proveniente del exterior, cifra superior en relación al histórico de los datos registrados. Este mayor valor durante el año 2023 se relaciona con el aumento en la demanda por pellet en el país, y la oportunidad que ello representó para comercializadores o empresas del rubro como forma de satisfacer la demanda de los usuarios que requerían evitar escenarios de años anteriores.

Importación Mensual Histórica de Pellets

La serie de tiempo con los datos mensuales de las importaciones de pellets de madera desde el año 2014 hasta el año 2023, expresadas en valor de la importación (dólares CIF) y cantidad importada (Kg) se grafica en la **Figura 1**.



(Fuente: Declaraciones de Ingreso (DIN); Importaciones a título definitivo ajustadas con sus documentos modificatorios. Servicio Nacional de Aduanas).

Figura 1. Importaciones mensuales de pellets (monto CIF y Cantidad).

Las tendencias y patrones estacionales entre el Monto CIF y la Cantidad están alineados, indicando que los cambios en la cantidad física de importaciones se relacionan a cambios en el valor monetario de las importaciones.

La tendencia (**Figura 2**), en general se muestra llana, lo que indica que las importaciones, tanto en monto CIF como en cantidad se han mantenido constantes en el periodo comprendido entre 2014 y mediados del 2022, con una leve tendencia al aumento correspondiente principalmente a los meses del año 2018. Estas fluctuaciones pueden estar influenciadas por eventos de desabastecimiento y factores económicos que afectaron al sector del aserrío, sector de la producción de pellet y al país en general, entre otras.

Después de octubre del 2022 se observa una notoria tendencia al alza de las importaciones, lo cual corresponde principalmente a que, durante el invierno del año 2022, la oferta de pellet en Chile no fue capaz de satisfacer la demanda, lo que ocasionó que muchos hogares no pudieran contar con este energético para calefacción. Por ende, durante el año 2023, para evitar el problema de desabastecimiento, comercializadores del sector optaron por las importaciones de pellet para equilibrar la oferta del producto.

Existen factores que influyen en la tendencia de una serie de tiempo como la demanda estacional, la que puede presentar periodos asociados con una demanda más alta, como la preparación para el invierno. Para analizar de mejor manera este comportamiento, en la **Figura 3**, se presenta la estacionalidad de la serie de tiempo estudiada, para el monto CIF y la cantidad, de las importaciones en pellets de madera.

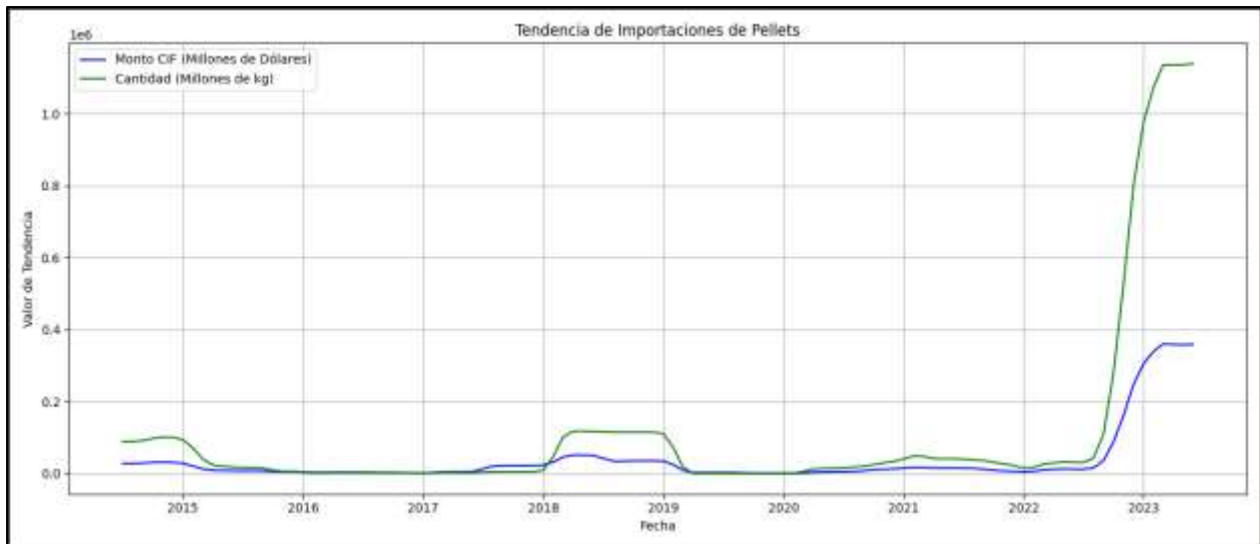


Figura 2. Tendencia de importaciones mensuales de pellets (monto CIF y Cantidad).

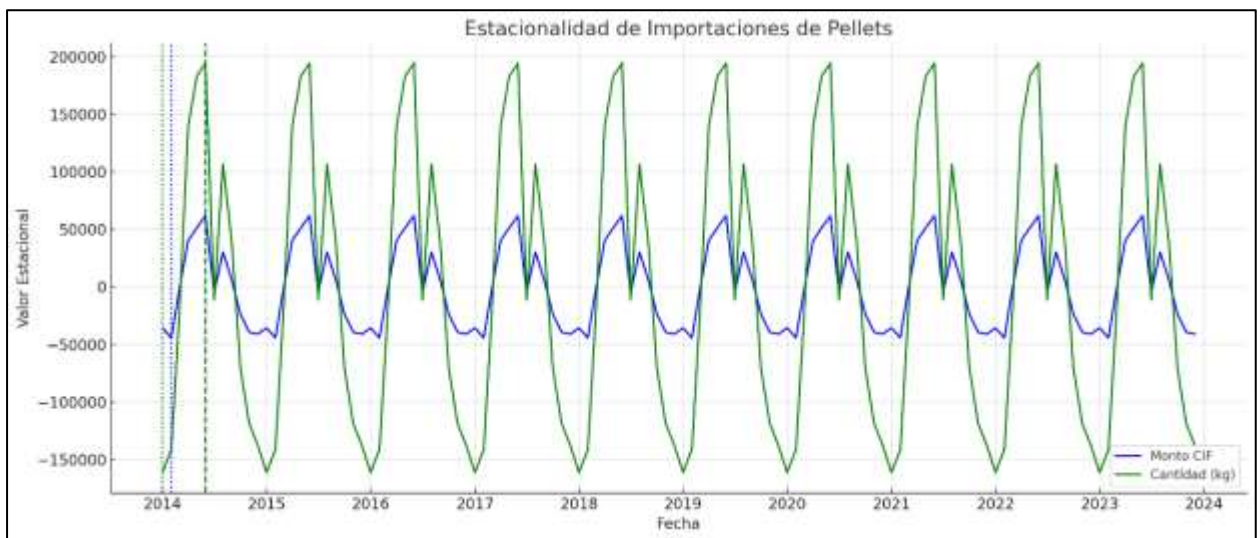


Figura 3. Estacionalidad de importaciones mensuales de pellets (monto CIF y Cantidad).

La componente estacional de las importaciones, tanto en Monto CIF como en cantidad, presentan fluctuaciones que se repiten a través del tiempo, observándose meses específicos donde el comportamiento de los valores de importación se repite de manera anual. Al respecto en la **Figura 4** se presentan los valores medios de cada mes, durante los 10 años de la serie de tiempo analizada.

Tanto en términos de valor CIF de las importaciones, como en la cantidad de las mismas, el mayor valor ocurre en el mes de junio. El significativo aumento de las importaciones durante este mes, seguramente obedece al descenso de temperatura del invierno, aumento de la demanda por este energético y posiblemente, por la existencia de una menor disponibilidad de pellet de origen nacional por el consumo previo.

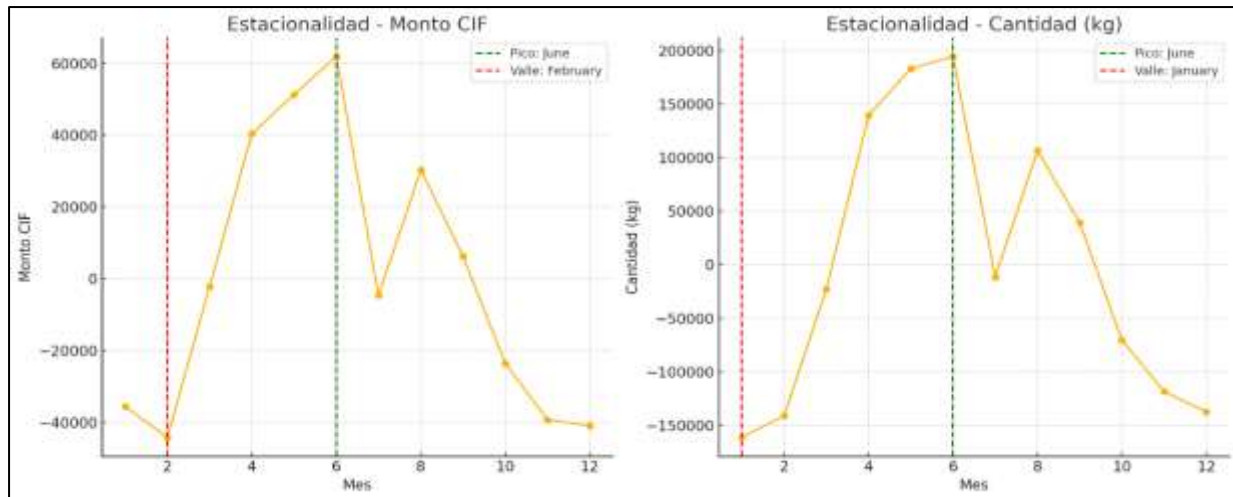


Figura 4. Estacionalidad de importaciones mensuales de pellets (monto CIF y cantidad).

Los valores menores difieren entre las dos series, el Monto CIF tiene su monto inferior en febrero, mientras que la Cantidad lo presenta en enero. Esta diferencia indicaría que, aunque la cantidad importada disminuye en enero, su valor se mantendría relativamente alto debido a probablemente a contratos o acuerdos comerciales que aún se estarían ejecutando en febrero.

El residuo de las series de tiempo analizadas (**Figura 5**) muestra la variabilidad que no puede ser explicada por la tendencia ni la estacionalidad. Idealmente debe presentar una media cercana a cero y sin patrones evidentes.

El análisis del residuo es relevante para determinar la calidad de los modelos de estimación, esperándose que no existan patrones a lo largo del tiempo. Para analizar los residuos se aplican diferentes pruebas estadísticas para determinar normalidad y autocorrelación de la serie de tiempo, luego de esto se determina si el modelo presenta apropiadas capacidades estimadoras, en caso contrario, se tendrá que ajustar el modelo para generar mejores predicciones.

La idea es que la media del residuo sea cercana a 0, pero según las magnitudes de los datos es necesario recurrir al porcentaje de la media en relación a su desviación estándar. Si este indicador es menor a 0,1 (10%) se considera que la media es cercana a 0.

En el caso de este estudio, en los residuos de la **Figura 5** se pueden observar patrones subyacentes, lo que puede significar autocorrelación en la serie de tiempo. Las medias y las desviaciones estándares de los residuos de las series de tiempo analizadas se muestran en el **Cuadro 4**.



Figura 5. Ruido o Residuo de importaciones mensuales de pellets (monto CIF y cantidad).

Cuadro 4. Media y Desviación estándar del residuo.

Variable	Monto CIF (US\$)	Cantidad (Kg)
Media del ruido	8.441	28.447
Desviación Estándar del ruido	109.955	351.445
Porcentaje de la Media sobre la Desviación Estándar	0,077	0,081

Se observa que la relación entre media y desviación estándar para Monto CIF y Cantidad es menor a 0,1, lo que sugiere que la media de los residuos es cercana a 0.

- *Test de normalidad (Prueba de Kolmogorov-Smirnov)*

Esta prueba indica si los residuos tienen un comportamiento normal. Es útil para bases con más de 50 datos y permite aceptar o descarta la hipótesis nula (H_0) de que la muestra sigue una distribución normal. Para los residuos de los valores y las cantidades del pellet importado, los estadígrafos de la prueba (**Cuadro 5**) con *p-values* muy inferiores a 0,05 rechazan la hipótesis nula y, por lo tanto, los residuos no exhibirían una distribución normal.

Cuadro 5. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Variable	Valor Kolmogorov-Smirnov	P-Valor
Monto CIF	0,2783	$6,93 \times 10^{-8}$
Cantidad	0,2680	$2,44 \times 10^{-7}$

Tal conclusión es consistente con las **Figuras 6 y 7**, donde se observa que la mayoría de los valores residuales están cerca de cero, pero hay algunos valores extremos que podrían indicar la presencia de *outliers*, que muy probablemente se deban al extraordinario aumento de las importaciones a partir de octubre del año 2022.

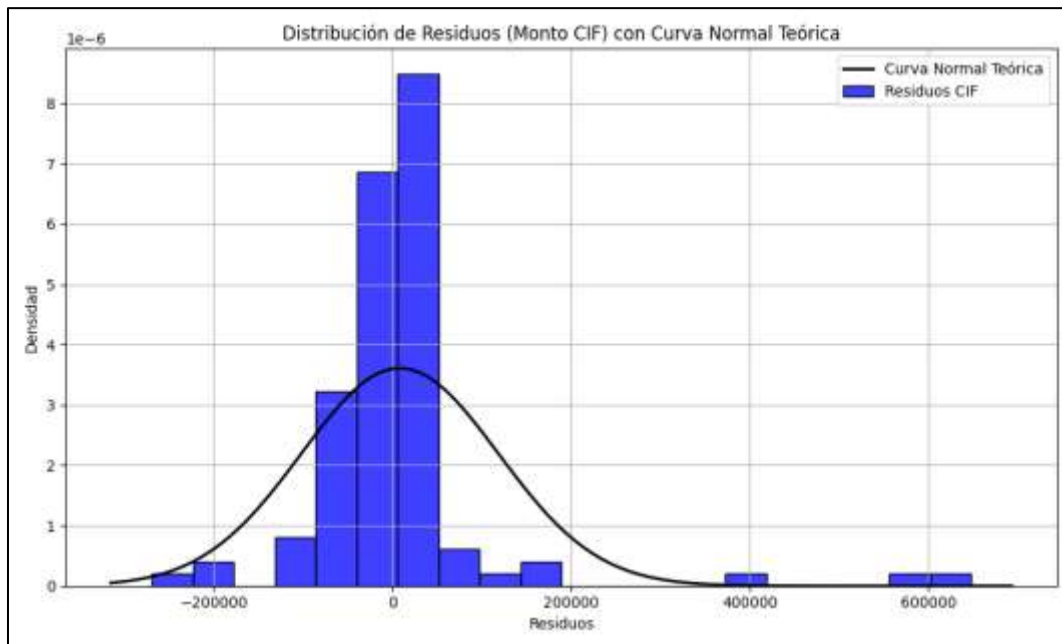


Figura 6. Normalidad de residuos de importaciones mensuales de pellets (monto CIF).

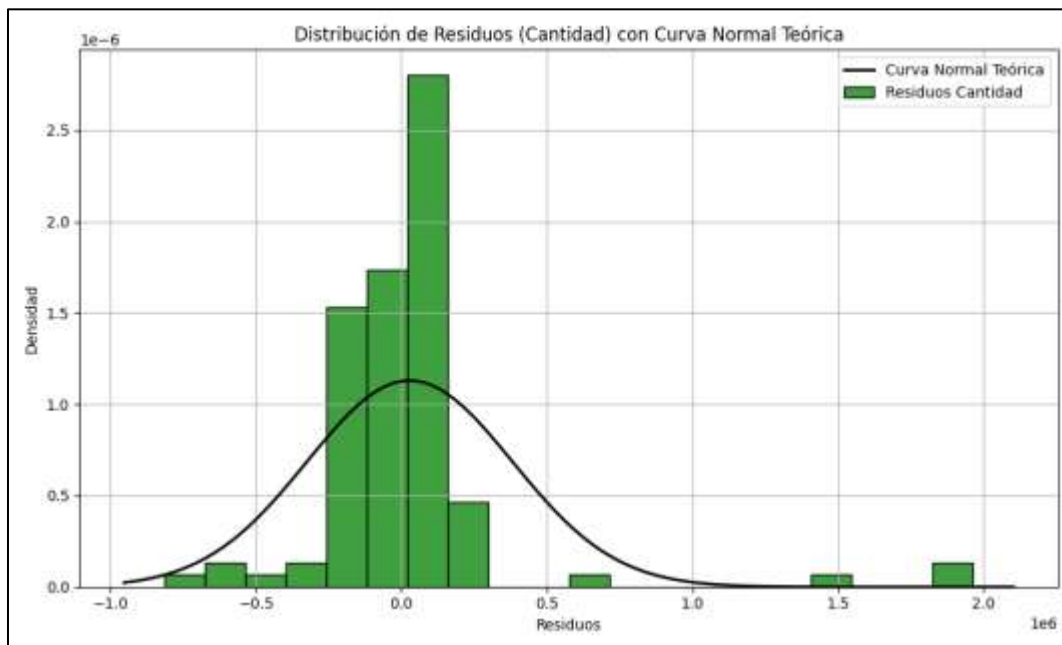


Figura 7. Normalidad de residuos de importaciones mensuales de pellets (Cantidad).

Finalmente, según los resultados de la prueba de normalidad y los gráficos revisados, se concluye que es probable que los residuos no tengan un comportamiento normal. A partir de este resultado se debería aumentar la base de datos existente y un análisis de la información para aumentar la factibilidad del modelo a desarrollar.

- *Test de autocorrelación (Prueba de Durbin Watson)*

El test de Durbin-Watson evalúa la autocorrelación en los residuos, usando como hipótesis nula (H_0) que el coeficiente de autocorrelación (ρ) es cero, es decir que no hay autocorrelación de primer orden en los residuos. Los valores del estadígrafo de la prueba (ver sección material y métodos) cercanos a 2 indican que no hay autocorrelación. En este caso, los resultados de este estadígrafo, para los residuos de las series valor y cantidad de las importaciones de pellet (0,338 y 0,322, respectivamente) sugiere una alta autocorrelación positiva en los residuos de ambas series (**Cuadro 6**).

Cuadro 6. Prueba de Durbin Watson.

Variable	Valor DW	N° de muestras (n)	N° de regresores (k)
Monto CIF	0,3382	116	1
Cantidad	0,3217	116	1

Para confirmar esta sugerencia, se calculan según tabla de Durbin Watson los valores críticos d_u y d_l , para crear el rango de aceptación [d_u ; $4 - d_u$] y los rangos de rechazo [0 ; d_l] y [$4 - d_l$; 4]. Estos valores dependen del número de residuos analizados y del número de regresores o variables utilizadas (Durbin & Watson, 1950). Los rangos calculados se presentan en la **Figura 8**.

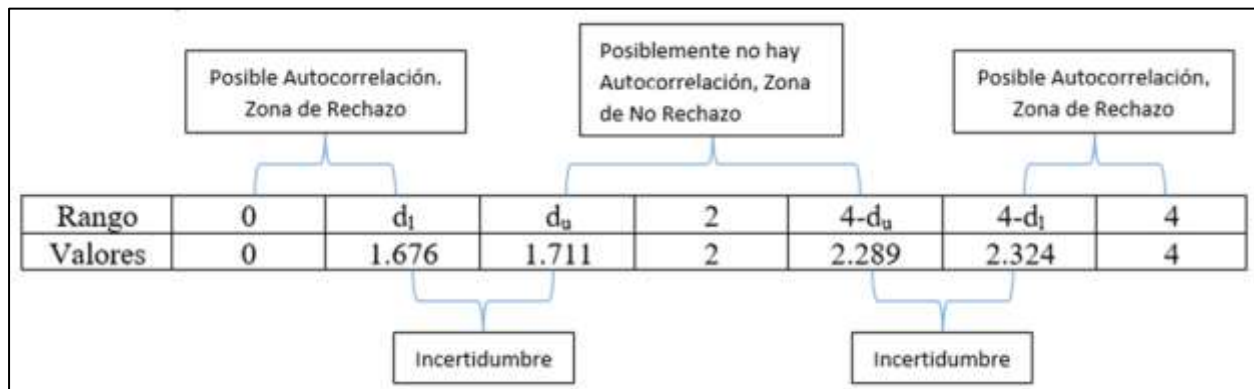


Figura 8. Rango de Aceptación y Rechazo para prueba de Durbin Watson.

Para ambas series, los valores del estadígrafo de la prueba DW se encuentran en el rango [0 ; d_l] en este caso [0 ; 1,676], lo que significa que se debe rechazar la hipótesis nula, indicando que existe autocorrelación de los residuos tanto de los montos CIF como de las cantidades importadas.

- *Test de Heterocedasticidad (Prueba de White)*

La prueba de White se utiliza para detectar la presencia de heterocedasticidad en una serie de residuos. Esto ocurre cuando la variabilidad de los residuos no es constante a lo largo de las observaciones. La hipótesis nula es que los residuos son homocedásticos, es decir que las varianzas son iguales.

En el **Cuadro 7** se aprecian los indicadores de la prueba White, apreciándose *p-values* (LM y F) menores que 0,05, lo que indica rechazar la hipótesis nula, concluyendo que los residuos presentan heterocedasticidad, es decir, varianza cambiante a través del tiempo.

Cuadro 7. Prueba de White.

Variable	Estadístico LM (Lagrange Multiplier)	P-Valor LM	Estadístico F	P-Valor F
Monto CIF	10,5043	0,00119	11,4205	0,00102
Cantidad	10,8730	0,00098	11,8663	0,00082

Para analizar los residuos, se usó el gráfico "Residuos vs Predicciones" (**Figura 9**), donde las predicciones vienen de ajustar un modelo de regresión lineal a los residuos en función del tiempo. Estas predicciones son esencialmente los valores ajustados del modelo para cada punto en el tiempo.

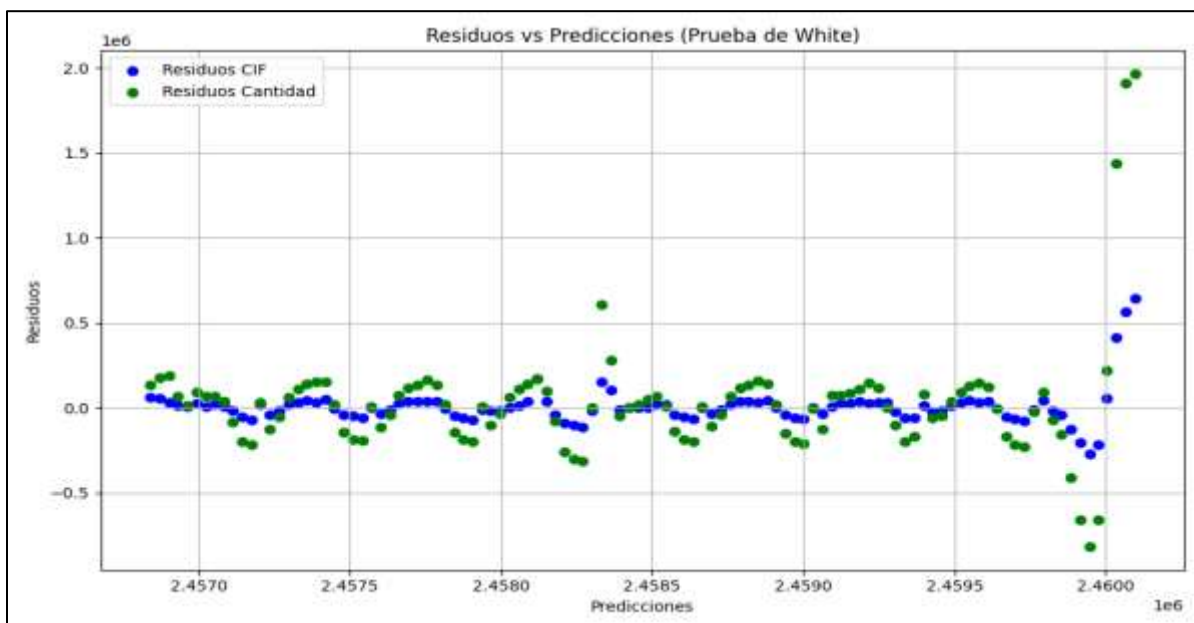


Figura 9. Residuos vs predicciones, Prueba White.

En el gráfico se observan patrones en la distribución de los residuos a través del tiempo, además, se aprecia que la dispersión de los datos es variable, lo que reafirma la heterocedasticidad de los residuos.

La falta de evidencia de normalidad, la alta correlación y la ausencia de homocedasticidad en los residuos, sugiere que podrían existir patrones de variación no capturados completamente en la descomposición inicial de las series evaluadas. Consecuentemente, puede ser necesario un análisis más profundo o requerir de un modelo complejo para generar las estimaciones de importación de pellet.

Es necesario analizar que otras variables, como la oferta y demanda de pellet de madera, pueden ser utilizadas como predictoras, dada su estrecha relación en la disponibilidad de este biocombustible.

Importación de Pellet durante el Año 2023

En el año 2023 se ha verificado, por lejos, la mayor importación de pellet de madera del periodo estudiado. Su distribución mensual se resume en el **Cuadro 8**.

Cuadro 8. Importaciones mensuales de pellet de madera durante el año 2023.

Mes	Cantidad (Ton)	Valor (Miles US\$ CIF)
Enero	2,11	0,72
Febrero	277,20	80,88
Marzo	1.334,01	413,08
Abril	2.714,90	814,99
Mayo	3.232,24	978,08
Junio	3.297,56	1.068,12
Julio	1.004,69	339,52
Agosto	1.615,69	577,43
Septiembre	112,33	16,34
Octubre	27,00	3,97
Noviembre	27,07	4,01
Diciembre	54,19	12,80
Total	13.699,03	4.309,93

Se observa un aumento en las importaciones de pellet de madera desde enero hasta junio. En este último mes se produjo la máxima importación, que alcanzó a cerca de 3.300 toneladas, por un valor CIF del orden de un millón de dólares. Luego se observa una disminución, alcanzándose en el mes de octubre la menor importación mensual del año 2023, con cerca de 27 toneladas y un valor CIF de 4 mil dólares.

El pellet que ingresa al país proviene de distintos países. La información del Servicio Nacional de Aduanas señala que, durante el año 2023, Brasil fue el principal origen de las importaciones de pellet de madera a Chile, con cerca de 3,6 millones de dólares, equivalentes al 83% del monto total importado ese año. Argentina es el segundo importador de pellet al país, registrando el 8,6% de las importaciones de pellet del año 2023. Además de Brasil y Argentina, se importó pellet desde otros 7 países (**Cuadro 9**). De ellos, Argentina envió pellets de madera durante casi todo el año, en 11 de 12 meses; seguido de Estados Unidos por 8 meses. Brasil, el principal país importador, sólo lo hizo en 7 meses durante el año 2023.

Cuadro 9. Monto de Importaciones de pellets de madera según país de origen.

País	Valor (Miles de US\$ CIF)	Participación (%)
Brasil	3.583,90	83,17
Argentina	385,81	8,95
Uruguay	205,88	4,78
EEUU	81,70	1,90
China	46,80	1,09
Paraguay	4,76	0,11
Canadá	0,24	0,01
Alemania	0,08	0,00
Indonesia	0,07	0,00
Total	4.309,24	100,00

(Fuente: Declaraciones de Ingreso (DIN); Importaciones a título definitivo ajustadas con sus documentos modificatorios. Servicio Nacional de Aduanas).

CONCLUSIONES

El crecimiento del sector del pellet en Chile requiere de la disponibilidad de biomasa forestal, tanto en calidad como en cantidad, debiendo el sector y usuarios enfrentar la incertidumbre de su abastecimiento. Entre las iniciativas para minimizar la incertidumbre de abastecimiento y satisfacer la demanda de los usuarios de pellets, se destaca el aumento de su producción en Chile, y también su importación desde otros países, de modo de asegurar abastecimiento y cubrir demandas por este biocombustible.

Desde el año 2014 hasta el año 2023 ingresaron 16.187,3 toneladas de pellet al país por un valor de US\$ 5.782.103 CIF. De ellas, cerca del 85% de los pellets (13.699 toneladas) y del 75 de su valor CIF (US\$ 4.309.926) lo hicieron el año 2023. En este año, Brasil fue el principal abastecedor, con cerca del 83,15% de los montos involucrados, equivalente a US\$ 3.583.902. Otros 6 países fueron origen de pellets, destacándose entre ellos Argentina (8,9%) y Uruguay (4,8%), en tanto los restantes aportaron cantidades marginales. Los mayores montos importados en 2023 se verificaron durante los meses de junio y agosto.

Luego de analizar la información disponible, se observa que las tendencias y patrones estacionales entre el valor (US\$ CIF) y el peso (Kg) están alineados, indicando que los cambios en la cantidad física de importaciones se relacionan a cambios en el valor monetario de las importaciones. El precio del pellet varía por distintos factores, entre ellos la estacionalidad propia de este biocombustible en Europa, lo que se agravó como consecuencia de la pandemia de Covid y el conflicto en Ucrania.

A inicios del año 2023 se observa un aumento en las tendencias de las importaciones, mientras que, al analizar la componente estacional de las importaciones, tanto en Monto CIF como en cantidad, se observan fluctuaciones que se repiten a través del tiempo, con meses específicos donde el comportamiento de los valores de importación se repite de manera anual. Específicamente, las importaciones aumentan durante el mes de junio.

Los datos analizados de importación de pellet indican que los residuos no cumplen los criterios de normalidad, homocedasticidad y ausencia de autocorrelación, indicando que pueden existir patrones de variación no capturados en el modelo. Para avanzar en esta temática se requiere de un análisis más profundo o la construcción de modelos complejos para generar estimaciones de importaciones, incorporando, además, otras variables, como la oferta y demanda de pellet de madera, entre otras.

Analizar los patrones de tendencia puede proporcionar información valiosa para la toma de decisiones estratégicas, identificando periodos de crecimiento sostenido o momentos para la planificación de optimización de costos y recursos.

El ingreso de pellet desde el exterior es una opción para satisfacer demandas crecientes por este Biocombustible, pero este proceso requiere de los medios o procesos que permitan asegurar la calidad de este Biocombustible para su consumo en el país.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo de Innovación y Competitividad de la Región del Biobío (FIC) del Gobierno Regional del Biobío, por el apoyo a la ejecución del programa "Programa Estratégico Regional para la Innovación y Desarrollo de Oportunidades Sustentables en el Uso de la Biomasa Forestal para la Generación de Energía Renovables en la Región del Biobío", Código BIP: 40036155-0, en cuyo marco se generó esta publicación.

REFERENCIAS

Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. & Ljung, G.M. (2015). Time Series Analysis: Forecasting and Control (5th ed.). Wiley.

- Brockwell, P.J. & Davis, R.A. (2016).** Introduction to Time Series and Forecasting (3rd ed.). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-29854-2>
- Chatfield, C. (2003).** The Analysis of Time Series: An Introduction (6th ed.). Chapman and Hall/CRC.
- Durbin, J. & Watson, G.S. (1950).** Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression: I. *Biometrika*, 37(3/4): 409-428. <https://doi.org/10.1093/biomet/37.3-4.409>
- Fisher, R.A. (1925).** *Statistical methods for research workers*. Edinburgh: Oliver and Boyd.
- White, H. (1980).** A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity. *Econometrica*, 48(4): 817-838. <https://doi.org/10.2307/1912934>
- Hollander, M. & Wolfe, D.A. (1999).** Nonparametric Statistical Methods (2nd ed.). Wiley.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018).** Forecasting: principles and practice (2nd ed.). OTexts.
<https://doi.org/10.32614/CRAN.package.fpp2>
- INN. (2017).** NCh ISO 17225-2:2017, Biocombustibles sólidos - Especificaciones y clases de combustibles – Parte 2: Clases de pellets de madera.
- Makridakis, S., Wheelwright, S. C., & Hyndman, R. J. (1998).** Forecasting: Methods and Applications (3rd ed.). Wiley.
- Ministerio de Energía. (2022).** Agenda de Energía 2022 - 2026. Ministerio de Energía Gobierno de Chile, 128p.
- Ministerio de Energía. (2023).** Propuesta desde la mesa del pellet para el desarrollo del sector. Documento orientador. Ministerio de Energía Gobierno de Chile, julio 2023, 32p.
- Pinilla Suárez, J., Luengo Vergara, K., Navarrete T., M., et al. (2022).** Antecedentes de abastecimiento de biomasa con fines energéticos, el caso del pellet en Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 28(2): 57-69.
<https://doi.org/10.52904/0718-4646.2022.565>
- Pinilla Suárez, J., Navarrete Ulloa F., García Inostroza J., Casanova del Río K., Navarrete Torres M., Luengo Vergara, K. (2024).** Reporte interno Producción pellet 2023.
- White, H. (1980).** A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, 48(4): 817-838. <https://doi.org/10.2307/1912934>



ARTÍCULO

Análisis de prueba de concepto del modelo red neuronal para detección de cambios en coberturas de plantaciones.

Felipe Guzmán Vargas¹; Catalina Zumaeta Guzmán¹; Carlos Bahamondez Villarroel¹; Rodrigo Sagardía Parga¹ & Carlos Buchner Asenjo^{1*}

¹ Instituto Forestal, sede Los Ríos. Valdivia, Chile. cbuchner@infor.cl

*Autor para correspondencia (arial 8)

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.611>

Recibido: 28.08.2024; Aceptado 10.09.2024.

RESUMEN

El seguimiento de los cambios en la cobertura forestal se ha realizado tradicionalmente con sensores remotos, pero en años recientes se ha incorporado el *Machine Learning* (ML), una rama de la Inteligencia Artificial (IA) que desarrolla algoritmos capaces de aprender de los datos y mejorar sin ser programados explícitamente.

El documento presenta una prueba de concepto de ML realizada en la región del Maule. Los resultados del uso de ML en este contexto fueron positivos, con una tasa de precisión del 92% en la métrica de asertividad y del 90% al predecir etiquetas para la provincia de Talca. Se concluye que los sistemas de clasificación basados en redes neuronales son una herramienta importante para optimizar los procesos de clasificación y complementarlos con análisis de datos de alta dimensión, permitiendo que estos se puedan adaptar a diferentes condiciones geográficas. Estos avances permiten una mejor comprensión y gestión de los recursos forestales en el país.

Palabras clave: Cambios en cubierta forestal, *Machine Learning* (ML)

SUMMARY

Monitoring changes in forest cover has traditionally been done with remote sensing, but in recent years Machine Learning (ML), a branch of Artificial Intelligence (AI) that develops algorithms capable of learning from data and improving without being explicitly programmed, has been incorporated.

The paper presents a proof of concept of ML carried out in the Maule region. The results of using ML in this context were positive, with an accuracy rate of 92% in the assertiveness metric and 90% in predicting labels for the province of Talca. It is concluded that neural network-based classification systems are an important tool for optimizing classification processes and complementing them with high-dimensional data analysis, allowing them to be adapted to different geographical conditions. These advances allow a better understanding and management of forest resources in the country.

Key words: Forest cover changes. *Machine Learning* (ML)

INTRODUCCIÓN

Para el seguimiento de los cambios temporales en la cobertura forestal se suele recurrir, por consideraciones de costos, al uso de sensores remotos, a partir de los cuales se buscan patrones característicos que permiten identificar estructuras asociadas a actividades ejecutadas sobre la cobertura de los bosques, por ejemplo, cambios en cobertura por cosechas o cortas intermedias, incendios forestales, nivel de severidad de estos, eventos climáticos extremos, como deslizamientos de tierra, *browning* por sequía extrema, eventos disruptivos de plagas, etc.

En el afán de efectuar monitoreo permanente, se han utilizado técnicas tradicionales de sensores remotos para la detección de cambios. Entre ellas las más comunes son el método de diferencias de imágenes, el uso de componentes principales, el análisis de vectores de cambios, diferencias en post clasificación entre otros (Lu *et al.*, 2004).

Todos estos métodos, independiente de cuál sea el seleccionado, terminan en la aplicación de técnicas de clasificación/regresión que permiten la asignación de clases/valores debidamente definidos por el usuario, por ejemplo, el uso de árboles de regresión, *k-nearest neighbors* y *support vector machine* (Breiman, 2001).

En tal contexto, se ha generalizado en los últimos años el concepto de *Machine Learning* (ML) que se lo reconoce como una rama de la Inteligencia Artificial (IA) que se centra en el desarrollo de algoritmos que pueden aprender de los datos y mejorar su rendimiento en tareas específicas, sin necesidad de ser explícitamente programados para ello (Zelin *et al.*, 2018). Esto lo diferencia de la programación tradicional, en la que las soluciones son programadas con un conjunto de instrucciones específicas que se deben seguir para resolver un problema tipo (Goodfellow *et al.*, 2016). Así, el ML se utiliza en variadas aplicaciones, como, por ejemplo, reconocimiento de voz, reconocimiento de imágenes, clasificación de texto, predicción de precios, recomendación de productos y control de robots.

ANTECEDENTES DE MACHINE LEARNING (ML)

En general se reconocen dos tipos principales de *Machine Learning*, el aprendizaje supervisado y el no supervisado

En el aprendizaje supervisado, el algoritmo de ML recibe un conjunto de datos de entrenamiento que contiene tanto datos de entrada como, datos de salida. El algoritmo aprende a asociar los datos de entrada con los datos de salida. Por ejemplo, un algoritmo de aprendizaje supervisado podría utilizarse para entrenar un sistema de reconocimiento de imágenes de animales.

El sistema sería entrenado con un conjunto de datos de entrenamiento que contenga imágenes de animales en distintos ángulos de visualización (técnica conocida como *augmentation*). El algoritmo aprenderá a asociar e identificar como animal en base a las distintas variantes comprendidas en las imágenes. Cuando se trata de responder a un resultado específico (p.ej. una clase) esto implica tres conceptos básicos:

- Clasificación: Cuando los valores de entrada son divididos en clases que provienen desde el conocimiento previo del operador respecto de los datos y que, el operador los agrupa en una “clase” discreta. Esto habilita el concepto de supervisión.
- Regresión: Equivalente a la clasificación, aunque involucra salidas de variables continuas, no discretas.
- Agrupamiento: Cuando los datos de entrada son divididos en grupos, pero a diferencia de la clasificación, estos grupos no son conocidos de antemano y su agrupación no necesariamente tiene un trasfondo explicativo.

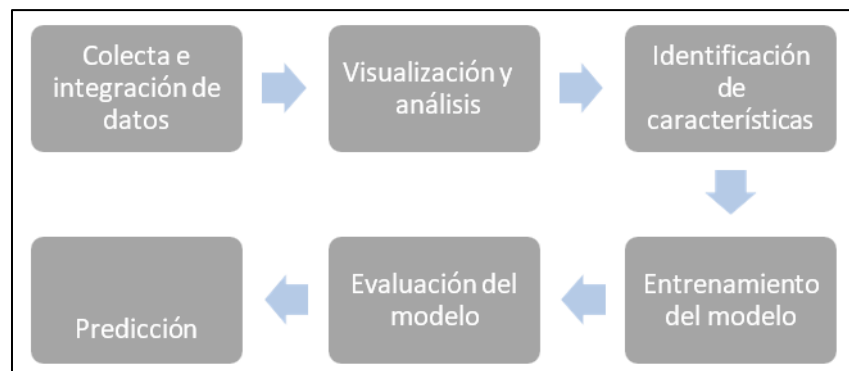
En el aprendizaje no supervisado, el algoritmo de ML recibe un conjunto de datos de entrenamiento que solo contiene datos de entrada. El algoritmo aprende a encontrar patrones en los datos de entrada. Por ejemplo, un algoritmo de aprendizaje no supervisado suele emplearse para agrupar datos por una cierta característica. El algoritmo aprenderá a encontrar patrones en los datos de la característica de interés. Al igual que en el algoritmo de supervisión en este tipo de ML se distinguen tres conceptos:

- Agrupamiento: Los datos son agrupados y separados por algún criterio de similitud.
- Visualización de datos: Utiliza herramientas que permiten visualizar datos en varias dimensiones.
- Modelos: Mediante la definición de un modelo de distribución de probabilidad de los datos de entrada, se habilita la generación de nuevos datos.

En general e independiente del tipo de ML a utilizar (supervisado o no supervisado) se debe considerar un conjunto de pasos metodológicos que aseguren la apropiada aplicación de los algoritmos de ML. Al momento de implementar un algoritmo de ML se visualizan los siguientes pasos:

1. Definición del Problema: Identificar debidamente el problema en la forma lo más simple posible.
2. Colecta de Datos: Reunir y habilitar los datos que serán utilizadas para entrenar el modelo.
3. Exploración de los Datos: Es aconsejable la utilización de métodos estadísticos y técnicas de visualización para reflejar de formas correcta la estructura de los datos.
4. Pre-proceso de Datos: Preparar los datos para modelación realizando normalizaciones y las transformaciones necesarias para aplicarlos al modelo.
5. División de los Datos: Dividir los datos en datos de entrenamiento y de prueba para validar el modelo.
6. Selección de un Modelo: Selección de un modelo de ML que sea apropiado al problema
7. Entrenamiento: Utilizar los datos de entrenamiento para entrenar el modelo, ajuste parámetros para mejorar desempeño del modelo.
8. Evaluar el Modelo: Utilizar los datos de prueba para evaluar el desempeño del modelo en base a una muestra de datos independiente.
9. Afinamiento del Modelo: Finalmente, en base a los resultados obtenidos por la evaluación con datos de prueba, reajustar los parámetros para mejorar la precisión del modelo.

Los pasos metodológicos anteriormente descritos dan origen al flujo conocido como *ML pipeline* y corresponde al flujo lógico de automatización de eventos necesarios de completar para aplicar ML (**Figura 1**).



(Fuente: Adaptado de Novak, 2020)

Figura 1. Diagrama general de un *pipeline* de *Machine Learning*.

Para ejecutar sus algoritmos ML se respalda en un conjunto amplio de disciplinas matemáticas y estadísticas, entre ellas se pueden mencionar:

- Álgebra lineal, incluyendo vectores y matrices, sistema de ecuaciones lineales, factorización de matrices y espacios vectoriales.
- Estadística, incluyendo estadígrafos básicos, test de hipótesis y teoría de estimación e inferencia.
- Geometría, incluyendo vectores y normas, distancias, medidas de similitud, proyecciones ortogonales, algoritmos geométricos, etc.
- Cálculo, incluyendo técnicas de diferenciación y derivadas.
- Probabilidades, incluyendo distribuciones discretas y continuas, distribuciones muestrales, teoría central del límite y ley de los grandes números.
- Regresiones
- Reducción de dimensiones

MATERIAL Y MÉTODO

Área de Prueba

La región del Maule presentaba en diciembre de 2021 una superficie de 412.873 ha de plantaciones, esto es 6.455 ha menos que en el año anterior. Se destaca la provincia de Talca, que concentra el 42% de la superficie regional de plantaciones forestales. En la región la especie predominante es *Pinus radiata*, con el 87% de la superficie plantada, y cuyas plantaciones disminuyeron en 5.532 hectáreas respecto del año 2020. En el mismo periodo la superficie de *Eucalyptus globulus* disminuyó en 758 ha.

En este contexto, para el desarrollo de la prueba de concepto de ML, asociada a variación de cobertura de plantaciones se trabajó en etapas relacionadas a: (i) Adquisición de imágenes satelitales, (ii) preprocesamiento y análisis de las imágenes, (iii) adquisición de características y preparación de los datos; y (iv) clasificación y medición (**Figura 2**).



Figura 2. Etapas para las pruebas de ML con una red neuronal

Adquisición de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales utilizadas corresponden a las imágenes de Sentinel-2, provistas por la Agencia Espacial Europea (ESA)¹. La selección de estas imágenes para el proceso de generación de los *dataset* se debe a su disponibilidad y acceso gratuito. Ellas cuentan con una resolución espacial de 10 metros, lo que permite detectar características de las plantaciones forestales en la región de interés. Además, la frecuencia de adquisición de imágenes es alta, garantizando la obtención de datos actualizados en el análisis.

Estructura de la Prueba de Concepto

Para el desarrollo de la prueba se realizaron los siguientes pasos:

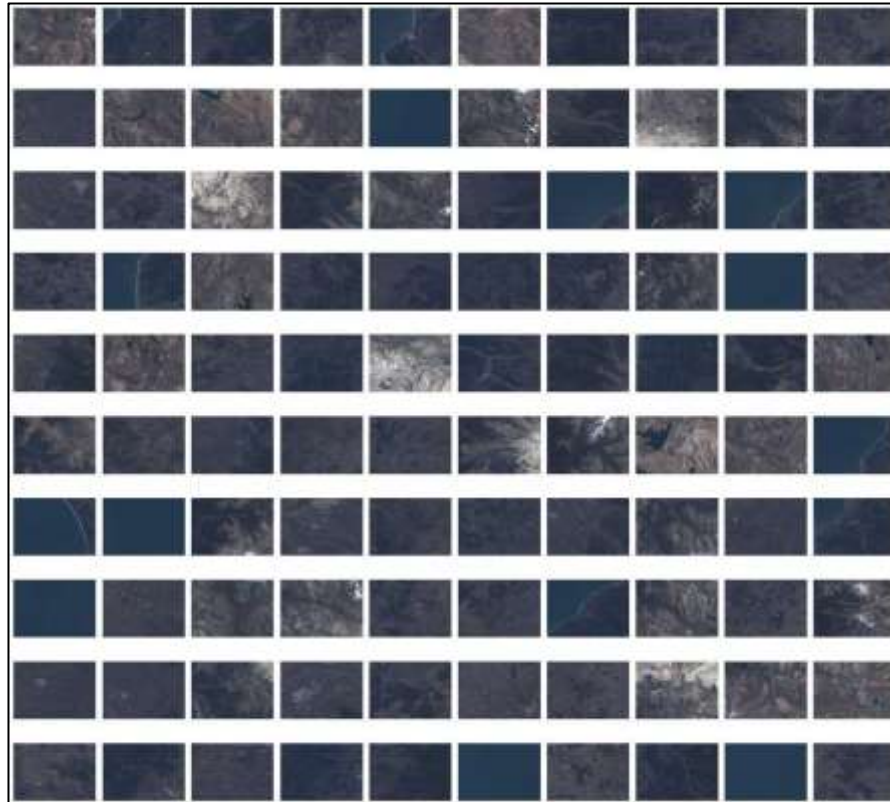
- *Paso 1: Generación de dataset en función de imagen sentinel-2 para la región del Maule.*

Para este caso se utilizaron imágenes del satélite Copernicus/Sentinel-2 correspondientes al periodo del año 2020 entre los meses de enero y diciembre. Los parámetros de selección corresponden a la exclusión de imágenes cuya cobertura de nubes fuese mayor al 20% en el caso de que exista impacto se reduce a través de la mediana. Las líneas de código para la selección de imágenes se presentan en el **Cuadro 1**, en tanto las imágenes obtenidas se muestran en la **Figura 3**.

¹ <https://www.esa.int/>

Cuadro 1. Código de selección de datos.

```
#Usando Sentinel-2  
collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2') \  
.filterBounds(geometry) \  
.filterDate('2020-01-01', '2020-12-31') \  
.filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 20))  
mosaic = collection.median()
```

**Figura 3.** Imágenes obtenidas con la selección regional a través de Geemap.

- *Paso 2: Descarga de Imágenes contenidas en el área de estudio*

Este proceso se realiza para el trabajo posterior, el cual será utilizado como el conjunto de datos en la fase de entrenamiento, la descarga de los datos se lleva a cabo con la librería de *Google Earth Engine* (EE)² la cual permite gestionar la descarga a través de *Google Drive*³.

- *Paso 3: Generación del mosaico*

Se utiliza la librería *Rasterio*⁴ para realizar un mosaico de las imágenes obtenidas a través del paso anterior para ello se emplea el código indicado en el **Cuadro 2**. El mosaico obtenido se muestra en **Figura 4**.

² <https://earthengine.google.com/>

³ <https://drive.google.com/>

⁴ <https://rasterio.readthedocs.io/en/latest/index.html>

Cuadro 2. Código de generación de mosaico

```
for archivo in tqdm(archivos, desc="Leyendo imágenes"):
    rasters.append(rasterio.open(archivo))
mosaico, transform = merge(rasters)
with rasterio.open('/data/mosaico/maule_mosaic.tif', 'w', **rasters[0].meta) as dest:
    dest.write(mosaico)
```



Figura 4. Mosaico para la región del Maule con Sentinel-2.

- Paso 4: Etiquetas de datos para imágenes (vectores)

Para el proceso de etiquetado de imágenes se utilizó las coberturas de cartografía de INFOR y CONAF, las que permitieron obtener las categorías de datos que pasaran a ser las etiquetas del modelo de *Machine Learning*.

En el caso de las coberturas de INFOR, la cartografía seleccionada corresponde a la de plantaciones del año 2021, que posee 16.716 registros polígonos. Esta cobertura ofrece 8 atributos de los cuales se seleccionaron atributos como especie y geometría, esta última, corresponde a la representación espacial de los polígonos en la cobertura.

En la **Figura 5** se presenta un análisis descriptivo de la cobertura de INFOR, en la cual se observa a través de un mapa la distribución geográfica los dos tipos de plantaciones seleccionados para esta prueba, el primero de ellos corresponde a *Pinus radiata* (en verde) y *Eucalyptus globulus* (en rojo). Se aprecia que las plantaciones de *Pinus radiata* son más prevalentes en la región en comparación con *Eucalyptus globulus* debido a la densidad en el mapa.

Adicionalmente se genera un conteo de especies para realizar una comparación cuantitativa del número de ocurrencias (conteo) de diferentes especies. Las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* tienen los conteos más altos, con *Pinus radiata* siendo el 63% de la data y *Eucalyptus globulus* con un 35%. Las otras

especies poseen conteos mucho menores lo que puede indicar menor presencia en la región.

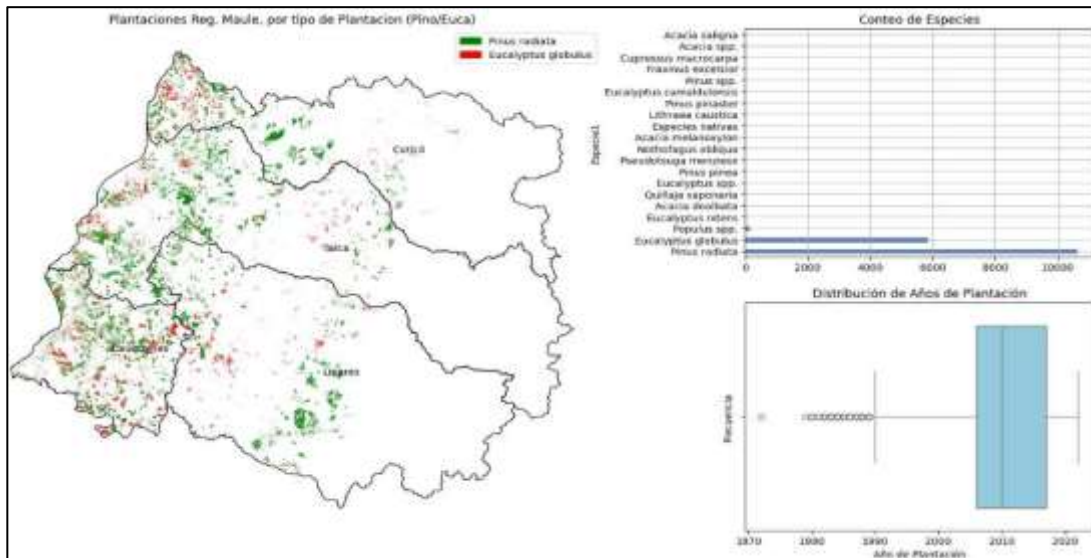


Figura 5. Gráficos descriptivos para cobertura de plantaciones

Por último, se visualiza la información a través de un histograma que muestra la frecuencia de plantaciones a lo largo de los años. Se aprecia un aumento alrededor del año 2000 y una frecuencia más baja en los años anteriores y posteriores a 2000. Algunos valores atípicos (*outliers*) están presentes antes de 1980.

Para el caso del castro vegetacional de CONAF se utiliza la del año 2016 con un total de 117.165 registros, de los cuales los atributos seleccionados corresponden a uso y geometría (Figura 6).

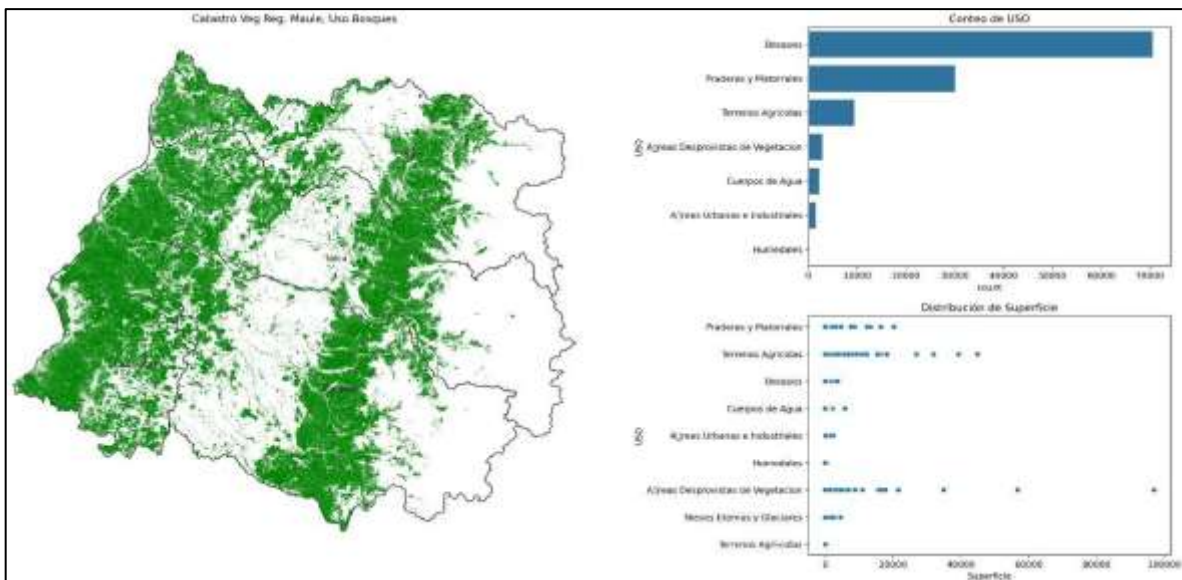


Figura 6. Gráficos descriptivos para cobertura de uso CONAF

De acuerdo al análisis descriptivo para las coberturas de CONAF presentes en la **Figura 6**, se puede señalar que en la representación el mapa muestra la cobertura vegetal o uso de la tierra, de color verde correspondiente al Uso de tipo bosque.

El segundo gráfico, el de barras, permite identificar las categorías de uso predominantes en la región, siendo "Bosques" la mayor cantidad con un 60%, seguida por "Praderas y Matorrales" de un 25% y "Terrenos Agrícolas" 7%, los otros usos de la tierra, como áreas urbanas e industriales, cuerpos de agua y humedales, tienen frecuencias mucho menores.

El tercer gráfico muestra la distribución de superficie por categoría de uso, se aprecia una concentración significativa de puntos en el extremo inferior del eje de superficie, indicando que la mayoría de los polígonos tienen superficies más pequeñas.

Los puntos dispersos a lo largo del eje X sugieren que hay menos polígonos con superficies grandes, y se aprecia una relación entre el tipo de uso y el tamaño de la superficie.

- *Paso 5: Clip de vectores en imágenes*

Una vez seleccionados los tipos y sus características, se obtienen las imágenes de los polígonos según el mosaico generado en los pasos anteriores, para ello se realiza una intersección del vector con la imagen ráster para realizar el proceso clip. Esto se realiza mediante la librería Rasterio usando el código del **Cuadro 3**.

Cuadro 3. Código de proceso clip entre vectores y raster

```
with rasterio.open(mosaic_path) as src: for _, row
    in chunk.iterrows():
        geom = row.geometry
        geom_mask = geometry_mask([geom], transform=src.transform, invert=True, out_shape=(src.height,
        src.width))
        out_image, out_transform = mask(src, [geom], crop=True)
        geom_mask = geometry_mask([geom], transform=out_transform, invert=True,
        out_shape=out_image.shape[1:])
        for i in range(out_image.shape[0]): out_image[i][~geom_mask] =
            src.nodata
            out_meta = src.meta.copy()
            out_meta.update({
                "driver": "GTiff",
                "height": out_image.shape[1], "width":
                out_image.shape[2], "transform":
                out_transform, "nodata": src.nodata
            })
            clip_name = f"clip_image_{os.path.basename(mosaic_path)}_{tipo}_{row.ID}.tif"
            output_path = os.path.join(output_directory, clip_name)
            with rasterio.open(output_path, "w", **out_meta) as dest: dest.write(out_image)
            print(f"Mosaico recortado guardado en {output_path}")

        results.append({'Polygon_ID':
            row.ID, 'Has_Clip': True,
            'Clip_Name': clip_name,
            'Clip_Path': output_path,
            'Image_Name': os.path.basename(mosaic_path),
            'Image_Path': mosaic_path,
        })
```

Este proceso guarda los resultados en un *dataframe* de pandas para ser analizado de manera posterior, a su vez las imágenes que son recortadas a partir del mosaico siguen manteniendo la información de todas las bandas como su formato (*.tif). Las imágenes se almacenaron en tres carpetas diferentes con el nombre de su categoría, es decir, Pinus, Eucalyptus y Bosque (CONAF). Para el caso de la última categoría, Bosque, se realizó una intersección espacial para determinar los polígonos de plantaciones que no interceptarán con el uso de bosque, esto permite no tener imágenes con dos categorías.

- **Paso 6: Aumento de datos o data augmentation para balanceo de imágenes**

Los resultados de este paso se indican en el **Cuadro 5**. A partir de ellos fue necesario aumentar las imágenes de la categoría con menos cantidad, es decir, *Eucalyptus*. Después, para que la red neuronal empleada no se vea afectada por el aumento de imágenes alteradas, se decide cortar el conjunto de datos en muestras de 10.000 datos por categoría, permitiendo tener un conjunto de datos balanceados con muestras similares.

El paso de aumento de las imágenes se realizó mediante la librería PIL tal como muestra en el código del **Cuadro 6**.

Cuadro 5. Aumento de datos para balanceo de imágenes

Especie	Numero de imágenes
<i>Eucalyptus globulus</i>	5.866
<i>Pinus radiata</i>	10.645
Uso de tipo bosques (CONAF)	70.665

Cuadro 6. Código de funciones para el aumento de datos

```
def random_rotation(image):
    """Aplica una rotación aleatoria a la imagen.""" return
    image.rotate(random.uniform(-40, 40))
def horizontal_flip(image):
    """Aplica una inversión horizontal aleatoria.""" if
    random.random() < 0.5:
        return ImageOps.mirror(image) return image
def vertical_flip(image):
    """Aplica una inversión vertical aleatoria.""" if
    random.random() < 0.5:
return ImageOps.flip(image)
```

- **Paso 7: Normalización de imágenes**

Luego de realizar el aumento de datos a las imágenes transformadas de *.tif a *.png se procede a normalizar el tamaño (ancho y alto) de las mismas. Esto permite tener imágenes cuyo tamaño sea inferior o igual a 64X64, y permite que las imágenes se visualicen como se observa en la **Figura 7**.

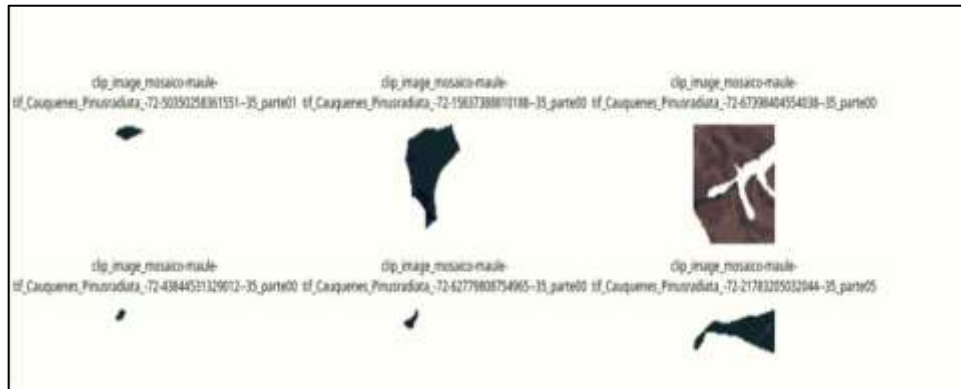


Figura 7. Miniaturas de imágenes inferiores o iguales a 64x64

- Paso 8: Selección del modelo

Para esta prueba de conceptos se utilizó un modelo de red neuronal tipo ResNet (*Residual Networks*), el cual se caracteriza por ser una red neuronal profunda que ha demostrado ser eficaz en diversos campos del aprendizaje automático, incluido el análisis de imágenes satelitales.

Esta red neuronal consta de una arquitectura basada en 50 capas de aprendizaje profundo utilizando conexiones residuales, también llamadas *skip connections*, que permite el flujo de gradientes directamente a través de la red, evitando problemas de desvanecimiento. Sus parámetros iniciales corresponden a 3 categorías, tal como muestra la Figura 8.

```

1 Model: "model_1"
2
3 Layer (type)                Output Shape          Param #    Connected to
4 -----
5 input_2 (InputLayer)        [(None, 64, 64, 3)]  0          []
6
7 zero_padding2d_1 (ZeroPadding2D) (None, 76, 76, 3)    0          ['input_2[0][0]']
8
9
10 conv2d_53 (Conv2D)           (None, 32, 32, 64)   9472       ['zero_padding2d_1[0][0]']
11
12 batch_normalization_53 (Batch Normalization) (None, 32, 32, 64)  256        ['conv2d_53[0][0]']
13
14 activation_49 (Activation)   (None, 32, 32, 64)   0          ['batch_normalization_53[0][0]']
15
16 max_pooling2d_1 (MaxPooling2D) (None, 15, 15, 64)  0          ['activation_49[0][0]']
17
18 conv2d_54 (Conv2D)           (None, 15, 15, 64)   4160       ['max_pooling2d_1[0][0]']
19
20 batch_normalization_54 (Batch Normalization) (None, 15, 15, 64)  256        ['conv2d_54[0][0]']
21
22 activation_50 (Activation)   (None, 15, 15, 64)   0          ['batch_normalization_54[0][0]']
23
24 ...
25
26 Total params: 23,593,858
27 Trainable params: 23,540,759
28 Non-trainable params: 53,129
    
```

Figura 8. Resumen de parámetros de la red neuronal ResNet-50

- Paso 9: Aplicación de la red neuronal

Para llevar a cabo esta prueba los datos se separaron en tres categorías: (i) Datos de entrenamiento, para que la red neuronal pueda llevar a cabo el proceso de aprendizaje (70%); (ii). Datos para realizar pruebas

de las predicciones llevadas a cabo por esta red (20%); y (iii) Datos utilizados para realizar la validación, a través de *cross validation* o validación cruzada, que permite generar ajustes en la red en caso de ser necesarios (10%). Para esta división se utiliza la librería de *tensorflow* que posee distintas funciones que permiten seleccionar las categorías directamente desde las carpetas donde residen las imágenes. Esto asigna una etiqueta por cada carpeta siendo la categoría que la red aplicará en cada una de sus iteraciones.

En el **Cuadro 7** se muestra el código para llevar a cabo la selección de la *data train* y *test* para la red neuronal.

Cuadro 7. Código de selección de entrenamiento y test mediante TensorFlow

```
train_dataset = datagen.flow_from_directory(batch_size=batch_size, directory=dataset_url,
shuffle=True, target_size=(img_height,
img_width), subset="training",
class_mode='categorical')

test_dataset = datagen.flow_from_directory(batch_size=16, directory=dataset_url,

shuffle=True, target_size=(img_height,img_width),
subset="validation", class_mode='categorical')
```

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el proceso de prueba de concepto fueron bastante alentadores, permitiendo la obtención de la métrica de *accuracy* o asertividad en un 92%. Los datos se obtuvieron con datos de entrenamiento. Adicionalmente para complementar las pruebas, se utilizó el modelo para predecir las etiquetas de la provincia de Talca, obteniendo un resultado del 90% de asertividad, tal como se muestra en la **Figura 9**. La tasa de asertividad indica que el modelo puede predecir con precisión la información relevante en un 90 % de los casos, lo que demuestra un buen desempeño en la tarea propuesta

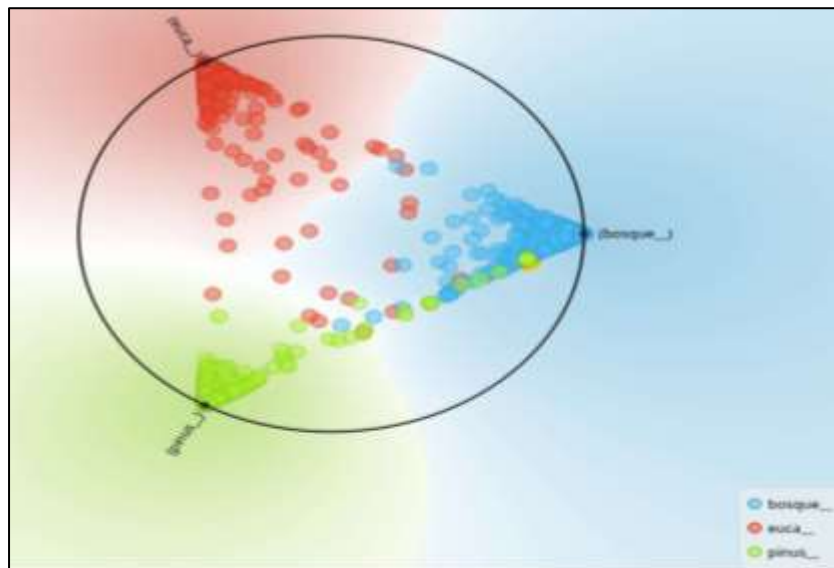


Figura 9. Resultados de predicción para la provincia de Talca, región del Maule.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La importancia de utilizar sistemas de clasificación basados en redes neuronales, para clasificar los tipos de bosques en Chile, radica en que permite modelar la complejidad de los sistemas forestales, captando la interacción entre factores como el bosque, el clima, el suelo y la productividad. Si bien este análisis se basa en las características de solo una región, la metodología expuesta puede ser replicadas en zonas cuyas áreas fuesen similares.

Para complementar este análisis, se pueden incorporar nuevas características de diferentes fuentes al *dataset*, por ejemplo, índices como NDVI (índice de vegetación), datos de campo, información climática u otros que permitan al *dataset* tener más características de las categorías a predecir. Si bien hay estudios actuales que usan otras técnicas para la preparación de los datos, los resultados obtenidos no son significativamente diferentes.

Para adecuar la red neuronal a distintas regiones, se debe tener en cuenta la diversidad de ecosistemas y condiciones climáticas, por lo mismo se aconseja reentrenar el modelo con los datos de diferentes regiones, es decir, ampliar el modelo con más datos. Esto debido a que las redes neuronales pueden ser entrenadas utilizando datos de diversas áreas, lo que permite obtener modelos robustos y precisos

En resumen, los sistemas de clasificación basados en redes neuronales son una herramienta importante para optimizar los procesos de clasificación, y complementarlos con análisis de datos de alta dimensión, permitiendo que estos se puedan adaptar a diferentes condiciones geográficas. Estos avances permiten una mejor comprensión y gestión de los recursos forestales en el país.

REFERENCIAS

- Breiman, L. (2001).** Random forests. *Mach. Learn.*, N° 45. Pp: 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E. & Moran, E. (2004).** Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2365-2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
- Goodfellow, I., Bengio, J. & Courville, A. (2016).** Deep learning. MIT Press. Cambridge, MA, USA. En: <http://www.deeplearningbook.org>.
- Novak, G. (2020).** Kubeflow: How to automate a machine learning workflow using Kubeflow Pipelines. En: <https://towardsdatascience.com/machine-learning-pipelines-with-kubeflow-4c59ad05522>
- Zelin, L., Changhui, P., Work, T., Candau, JN., DesRochers, A. & Kneeshaw, D. (2018).** Application of machine-learning methods in forest ecology: recent progress and future challenges *Environmental Reviews*, 26(10) <https://doi.org/10.1139/er-2018-0034>



APUNTE

Bacterias y semillas: Una apremiada relación mutualista en el trópico.Alexis Domínguez-Liévano¹; Anne Ashby Damon^{1*} & Arnoldo Wong Villarreal²¹Departamento Ciencias de la Sustentabilidad. El Colegio de la Frontera Sur. Unidad Tapachula. Chiapas. México.²División Agroalimentaria. Universidad Tecnológica de la Selva. Ocosingo. Chiapas. México.

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.608>

Recibido: 16.06.2024; Aceptado 24.07.2024.

RESUMEN

Se explica brevemente algunos elementos que permiten entender de mejor manera la relación mutualista entre las bacterias endófitas y las semillas. Se menciona la definición de los microorganismos endófitos en el contexto de la ecología y manejo de plantas. Posteriormente se menciona lo fundamental que son las bacterias endófitas en las semillas durante la restauración forestal. Finalmente, se explica a manera de conclusión, en el contexto actual y futuro, la importancia de la investigación para conocer el papel que juegan las bacterias endófitas para la propagación por semillas de especies forestales.

Palabras clave: Bacterias endófitas, conservación, germinación, repoblación natural.

SUMMARY

In this short disclosure note, we briefly explain some elements that allow us to better understand the mutualistic relationship between endophytic bacteria and seeds. The definition of endophytic microorganisms in the context of plant ecology and management is mentioned. Subsequently, it is mentioned how fundamental endophytic bacteria are in seeds during forest restoration. Finally, the current and future context on the importance of research to know the role played by endophytic bacteria for the seed propagation of forest species is explained.

Key words: Endophytic bacteria, conservation, germination, natural repopulation.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las personas han visto la merma de los recursos naturales en las regiones tropicales del mundo, y México no es la excepción. La pérdida de ecosistemas tropicales causa bastante preocupación, por la disminución de flora y fauna y sus interacciones de apoyo mutuo que sostienen la vida en el planeta Tierra. En consecuencia, hay una demanda por incrementar las plantaciones forestales, pero ahora con un enfoque más consciente, más enterado y menos centrado en lo económico; cada vez más se enfoca en especies de árboles nativos para asegurar su conservación, y en el caso de la comercialización de maderas preciosas hoy día se premia un enfoque de aprovechamiento sustentable. Para lograr la restauración y conservación de especies de árboles nativos, es necesario implementar procesos más eficientes de producción de plantas en vivero, y para ello, se puede recurrir a nuevos enfoques biotecnológicos, en los que se reconozcan y apliquen en nuestro favor, los atributos, sustancias que producen, y procesos que realicen, los hongos, bacterias, insectos, animales y plantas que nos rodean.

Bajo esta premisa, se sabe que la reproducción de la mayoría de las especies de árboles se lleva a cabo a través de semillas, mismas que se deben manipular de diferentes maneras según su cubierta de protección y especificaciones biológicas derivadas de las condiciones prevalecientes de su hábitat natural, para favorecer los procesos de germinación y el desarrollo de la nueva planta. En los últimos años se ha

estado contemplando el uso de microorganismos benéficos para facilitar y hacer más eficiente la germinación, emergencia de la raíz y crecimiento de los nuevos árboles.

MICROORGANISMOS ENDÓFITOS: DEFINICIÓN

Cuando se habla de microorganismos en el contexto de la ecología y manejo de plantas, usualmente se piensa en las bacterias y los hongos, pero también abarca a otros organismos menos conocidos, como las arqueas, protozoos, algas y virus. Se llama endófitos a las bacterias y hongos que conviven en los tejidos internos de las plantas, mayormente en las raíces, sin causar algún efecto negativo o daño, y pudiendo llegar a influenciar de forma muy importante los procesos fisiológicos de las plantas y la manera de interactuar con el entorno. La mayoría de las plantas se asocian con bacterias endófitas y es menos común la asociación estrecha con hongos endófitos.

Las primeras evidencias de las asociaciones entre microorganismos endófitos y plantas se originaron de la observación de tejidos y hojas de plantas fosilizadas, allí se encontraban huellas de los microorganismos, dando soporte a que la asociación planta-endófito pudo surgir junto con la aparición de las primeras plantas en la tierra.

Es impresionante la gran diversidad de bacterias que se pueden encontrar en la naturaleza, diversidad de la cual hoy en día se conoce solo una pequeña fracción. No hay consenso sobre la forma en que se desarrolló la interacción de las bacterias con las plantas, algunas hipótesis apuntan que todo se originó a partir de los microorganismos del suelo, logrando acceso por vía de los poros, o estomas en su caso, de las raíces, tallos y hojas, o áreas de emergencia de raíces laterales y también están presentes en las semillas. Queda claro que estas asociaciones representan un medio de adaptación y protección en relación con las condiciones ambientales, a favor de la planta hospedadora, aprovechando las bondades y diversas habilidades de los microorganismos endófitos asociados.

La relación bacteria endófito-planta juega un rol fundamental en la vida de las plantas. Son capaces de captar y concentrar nitrógeno del aire, movilizar y hacer accesibles a las plantas nutrientes absorbidos desde el suelo (p.ej. el fósforo), producir sustancias que estimulan y regulan el crecimiento vegetal, y también puedan participar en procesos de protección de la planta contra plagas y enfermedades.

RESTAURACIÓN FORESTAL Y BACTERIAS ENDÓFITAS EN SEMILLAS

Las semillas constituyen el punto de partida de mejorar y hacer más eficientes las estrategias de producción de árboles nativos, como medida de recuperación y conservación de los recursos naturales de las selvas y bosques en las regiones tropicales. En tales semillas se encuentran también las bacterias endófitas que puedan ayudar en el proceso de propagación.

Las investigaciones sobre bacterias endófitas en las semillas han generado mayor información para semillas de interés agronómico (p.ej. arroz, algodón y maíz) en comparación con las forestales. Se han aislado bacterias endófitas de variedades criollas de maíz y muchas de estas bacterias demostraron propiedades que podrían ser benéficas para las plantas, como la producción de hormonas que estimulan el crecimiento (auxinas), la habilidad de solubilizar fosfatos, y la captación y fijación de nitrógeno, para hacer estos importantes nutrimentos más accesibles para la planta (Lew-Sánchez *et al.*, 2015). En otro estudio, bacterias fueron aisladas de las semillas de *Espeletia grandiflora* de la familia de los girasoles (*Asteraceae*), y todas ellas demostraron efectos benéficos para la germinación de las semillas. Cabe mencionar que las semillas de esta planta son consumidas y luego defecadas por animales y de allí se sugiere otra fuente de bacterias posiblemente benéficas (Guzmán, 2020). Entre los pocos ejemplos de árboles, se ha observado que, en semillas de eucalipto cultivado como árbol forestal, las bacterias endófitas ingresan desde el suelo, pasando por las raíces hacia el resto de la planta, y hay evidencia que estas bacterias podrían proteger las semillas, y los primeros pasos de germinación, contra patógenos. Aún falta evaluar las comunidades de bacterias endófitas en semillas que podrían proteger y agilizar la propagación de la mayoría de las especies forestales de interés. Estas investigaciones son clave para poder diseñar

mejores técnicas y herramientas para los programas de restauración, los que tan urgentemente se necesitan en todo el mundo.

Todo apunta a que la principal fuente de obtención de bacterias endófitas se encuentra en el suelo, desde donde las bacterias entran al tejido vascular de su hospedero, pasando por las raíces hasta los tallos, hojas, flores y semillas. Sin embargo, la planta debe ser quien efectivamente selecciona y filtra el tipo y cantidad de bacterias endófitas que necesita.

Las plantas hospederas obtienen varios beneficios, pero ¿qué obtienen a cambio las bacterias endófitas? Ellas se benefician de los productos hechos por las plantas mediante el proceso de la fotosíntesis, que son los productos energéticos, los carbohidratos. A partir del suministro de nutrimentos derivados del suelo e ingresadas desde las raíces, combinados con los carbohidratos generados por la fotosíntesis, las plantas fabrican otras sustancias como los aminoácidos, ácidos orgánicos, flavonoides y lípidos que también las pueden compartir con las bacterias para sus funciones vitales. Y es así como esta interacción mutualista ha prevalecido a lo largo de miles, hasta millones de años.

Los trabajos de identificación de bacterias endófitas que se han realizado en semillas forestales apuntan a cepas del género *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Burkholderia* y *Bacillus*, entre las más conocidas hasta el momento. Hay pocos ejemplos de trabajos con árboles forestales, pero ahora tenemos evidencia de la presencia de bacterias del género *Bacillus* en semillas de *Cedrella odorata* L. (Cedro rojo) que tiene actividad contra las enfermedades causados por hongos patógenos como *Alternaria solani*, *Fusarium* y *Phytophthora capsici*, que afectan a cultivos de importancia económica. También se han identificado la producción de sustancias como las fitohormonas (p. ej. ácido indolacético) que estimulan el crecimiento de las plantas (**Figura 1**) (Espinosa *et al.*, 2021).

Así como las bacterias endófitas se encuentran presentes en las semillas, podemos encontrar otras bacterias asociadas con las raíces, pero no adentro de ellas, sino en el espacio alrededor de las raíces que se llama rizósfera. Estas bacterias también pueden contribuir a la germinación de las semillas y desarrollo de las nuevas plantas. Las funciones desempeñadas por estas bacterias son parecidas a las de las bacterias endófitas de las semillas: fijan nitrógeno, que sirve a las plantas para la producción de proteínas y sustancias de defensa; movilizan y hacen accesibles los nutrientes del suelo; promueven la formación de sustancias de crecimiento vegetal; protegen a las plantas contra plagas; y también mejoran la estructura del suelo, por mencionar algunas. Chávez-Ambriz *et al.* (2016) obtuvieron aislados bacterianos pertenecientes al género *Bacillus* a partir de muestras del suelo próximo a las raíces de los cactus *Mammillaria magnimamma* Haw. y *Coryphantha cornifera* (DC.) Lem. En pruebas realizadas con los aislados obtenidos, se aumentó la germinación de las semillas hasta un 34,3% con respecto a las semillas sembradas sin las bacterias.

CONCLUSIONES

Apenas se está contemplando la importancia de la investigación para conocer el papel que juegan las bacterias endófitas en la propagación por semillas de especies forestales. Las nuevas tecnologías que permiten el análisis genético, de proteínas y de otros componentes esenciales de la vida (los estudios ómicos) permitirán conocer la diversidad de microorganismos que conviven en las semillas, así como las características y aportaciones de interés biotecnológico que poseen.

Considerando el impacto cada vez más evidente del cambio climático en las regiones tropicales, interacciones mutualistas entre semillas y bacterias endófitas representan una herramienta para superar los estragos del clima, cada vez más desequilibrado y extremo, con aumentos de temperatura, lluvias torrenciales, vientos huracanados, y a su vez en otros sitios, sequías extendidas y olas de temperaturas frías. Las bacterias se reproducen mucho más rápido que las plantas, encadenando procesos de la sobrevivencia y selección de solo los individuos más aptos para sobrellevar los cambios del momento que se presentan en su entorno. Este proceso de adaptación es como una actualización de un organismo para poder sobrevivir; las bacterias lo logran más rápidamente, y luego, efectivamente transfieren el beneficio de su rápida adaptación a sus plantas hospederas. Esto sugiere que la inoculación de bacterias podría

usarse en programas de conservación o mantenimiento de poblaciones de especies de árboles y otras plantas, y podría ser clave en el caso de especies en alguna categoría de riesgo.



(Fuente: Espinosa-Zaragoza *et al.*, 2021)

Figura 1. Antagonismo de tres aislamientos contra hongos patógenos. Las columnas de control significan que el hongo se inoculó sin un fitopatógeno. Fila 1: *Phytophthora capsici*; fila 2: *Fusarium sp.*; fila 3: *Alternaria solani*.

AGRADECIMIENTOS

A El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Tapachula por proporcionar las condiciones para que el primer autor realice investigaciones relacionadas a la restauración forestal en México. Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías, por su apoyo económico en el Doctorado en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable con beca CVU 953615.

A la Dr. Karen B. Hernández Esquivel, por el tiempo ocupado en sus comentarios y observaciones para mejorar el documento.

REFERENCIAS

Chávez-Ambriz, L.I.A., Hernández-Morales, A., Cabrera-Luna, J.A., Luna-Martínez, L. & Pacheco-Aguilar, J.R. (2016). Aislados de *Bacillus* provenientes de la rizosfera de cactus incrementan la germinación y la floración en *Mammillaria* spp. (Cactaceae). Revista Argentina de Microbiología, 48(4): 333-341. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.09.001>

- Espinosa-Zaragoza, S., Sánchez Cruz, R., Sanzón Gómez, D., Escobar Sandoval, M.C., Yáñez Ocampo, G., Morales Constantino, M.A. & Wong Villarreal, A. (2021).** Identificación de bacterias endófitas de semillas de *Cedrela odorata* L. (*Meliaceae*) con características biotecnológicas. *Acta Biológica Colombina*, 26(2): 196-206. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v26n2.85325>
- Guzmán-Cárdenas, A.M. (2020).** Bacterias endófitas promotoras del crecimiento vegetal presentes en las semillas de *Espeletia grandiflora* y la relación con sus dispersores biológicos. Universidad El Bosque. 85 pp. <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/6c459512-5abc-4cb2-a171-1f9fcf545fed>
- Lew-Sánchez, B.E., Becerra Fuentes, I., Huerta, A. & Beltrán Garcí, M. (2015).** Obtención de bacterias endófitas de distintas variedades de maíz: evaluación de sus propiedades agronómicas. Resumen del XVI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Universidad Autónoma de Guadalajara, México. 1 p. <https://smbb.mx/congresos%20smbb/guadalajara15/PDF/XVI/trabajos/II/IIC-103.pdf>



APUNTE

Micropropagación de raulí: Una alternativa viable y apropiada para la producción comercial.

Roberto Ipinza Carmona^{1*}; Ana Sabja Giacaman²; Braulio Gutiérrez Caro³ & María Molina Brand³.

¹ Instituto Forestal, Sede Los Ríos, Valdivia. Roberto.ipinza@infor.cl

² PLANGEN, Valdivia.

³ Instituto Forestal, Sede Biobío, Concepción.

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.610>

Recibido: 06.8.2024; Aceptado 29.8.2024.

RESUMEN

Este artículo aborda la importancia del raulí (*Nothofagus alpina*) como especie maderable de alta calidad en Chile y la necesidad de implementar métodos sostenibles para su producción. Se destaca el valor económico de la madera de raulí y su creciente demanda, lo que ha generado preocupación por la conservación de esta especie nativa. Se menciona la *vecería* (variación interanual en la producción de semillas) como un desafío para la regeneración natural y la producción de plantas en vivero. El artículo propone la micropropagación como una alternativa viable para la producción comercial de raulí. Se describe el proceso de micropropagación, que incluye la selección de material genético de alta calidad, el cultivo *in vitro* de explantes y la aclimatación de plántulas.

Se concluye que la micropropagación es una técnica madura y lista para ser implementada a escala comercial, ofreciendo una oportunidad para mejorar la productividad y calidad de las plantaciones de raulí. Se enfatiza la necesidad de continuar investigando para optimizar los costos y la eficiencia de la micropropagación.

Palabras clave: *Nothofagus alpina*, clonación, micropropagación.

SUMMARY

This article discusses both, the importance of raulí (*Nothofagus alpina*) as a high-quality timber species in Chile, and the need to implement sustainable methods for its production. It highlights the economic value of raulí wood and its growing demand, which has raised concerns about the conservation of this native species. It mentions the *vecería* (inter-annual variation in seed production) as a challenge for natural regeneration and nursery production. The article proposes micropropagation as a viable alternative for the commercial production of raulí. The micropropagation process is described, which includes the selection of high-quality genetic material, *in vitro* cultivation of explants and acclimatization of seedlings.

It is concluded that micropropagation is a mature technique ready to be implemented on a commercial scale, offering an opportunity to improve the productivity and quality of raulí plantations. The need for further research to optimize the costs and efficiency of micropropagation is emphasized.

Key words: *Nothofagus alpina*, cloning, micropropagation.

INTRODUCCIÓN

El raulí (*Nothofagus alpina* Poepp. et Endl. Oerst.) es actualmente una de las especies arbóreas nativas de Chile más reconocidas por su madera de alta calidad, sanidad y valor económico. Su demanda en el mercado nacional e internacional ha incrementado su precio, especialmente para las dimensiones mayores que son exportadas. Según Pardo (2024), el precio de la madera aserrada de raulí puesta en aserradero oscila entre 388.000 y 1.653.600 pesos por metro cúbico, dependiendo de la calidad y región de origen. La

madera dimensionada y cepillada alcanza precios aún mayores, llegando hasta \$1.854.576 por metro cúbico en la Región Metropolitana.

La demanda por raulí para establecer plantaciones comerciales se debe también a su mayor resistencia sanitaria, lo que hoy es más relevante que nunca, debido a la presión de selección que impone el cambio climático. El raulí es más resistente que el roble al barrenador de la corteza (*Holopterus chilensis*).

El alto valor del raulí también se debe a sus características físicas y estéticas, como su estabilidad, resistencia, durabilidad y belleza, que lo hacen ideal para la fabricación de muebles, pisos y revestimientos de alta gama (**Figura 1**).



(Fuente: Jacob-Dazarola, 2024)

Figura 1. Aplicaciones y usos sugeridos para la madera de raulí por sus atributos técnicos

Sin embargo, la creciente demanda por madera de raulí, y la explotación desmedida de sus bosques, han generado preocupación por la conservación del acervo genético de esta especie nativa de los bosques templados de Chile y Argentina. Es fundamental implementar prácticas de manejo forestal sostenible y establecer plantaciones a gran escala en sitios apropiados, para asegurar la disponibilidad de esta valiosa madera en el futuro. Existen varias razones por las cuales la cosecha sustentable de bosques naturales de raulí aún no ha sido posible, pero también existen alternativas tecnológicas para establecer plantaciones competitivas desde donde obtener esta madera. En tal contexto, el presente artículo pretende mostrar y promover a la propagación vegetativa, y en especial la micropropagación de raulí, como una alternativa operacional de adecuada madurez tecnológica, para establecer plantaciones comerciales de raulí.

AÑERISMO O VECERÍA

El añerismo o vecería es un fenómeno biológico caracterizado por la fluctuación interanual en la producción de semillas (Donoso *et al.*, 2004). En este patrón, los años de alta producción de semillas (años semilleros) se alternan con años de baja o nula producción, fenómeno que es común en muchas especies de árboles forestales, incluido el raulí. La vecería es causada por una compleja interacción de factores genéticos, fisiológicos y ambientales, y tiene importantes implicaciones ecológicas, especialmente en la regeneración natural del bosque y en la economía. El añerismo puede afectar la disponibilidad de semillas para la reforestación y la producción de plantas en viveros. En años de baja producción, la escasez de semillas puede aumentar los costos y dificultar los programas de restauración ecológica basados en genética (procedencias y número de árboles apropiados, no emparentados). Los estudios realizados en Argentina

sobre la producción de semillas de raulí indican una tendencia cíclica, con una producción abundante cada dos años. Sin embargo, esta tendencia general puede variar entre poblaciones y años específicos. Algunas poblaciones muestran una producción relativamente constante, mientras que otras pueden tener intervalos más largos entre años de alta producción de semillas. Este fenómeno obliga a almacenar semillas durante los años de baja producción, lo que implica disponer de centros de almacenamiento de semillas para cubrir los períodos en los que la producción no es suficiente para satisfacer la demanda.

OPORTUNIDAD: HACIA LA SILVICULTURA CLONAL

A pesar de existir un programa de mejoramiento genético por vía semilla (sexual) (Ipinza *et al.*, 2000), este enfoque no permite transferir a plantaciones operacionales todas las ganancias en volumen aprovechable. La propagación vegetativa permite transferir toda la varianza genética a los descendientes, duplicando la ganancia genética asociada a los esquemas sexuales.

La oportunidad radica en que existe material genético seleccionado con énfasis en la rectitud de fuste, atributo que es fundamental para el rendimiento y aprovechamiento industrial de las trozas (**Figura 2**); que se dispone de las herramientas biotecnológicas adecuadas para multiplicar este material genético (micropropagación y *fingerprinting*); y que además existe la demanda por parte de las empresas para aprovechar dicho material.



Figura 2. Selección de árboles plus con alta intensidad de selección.

MICROPROPAGACIÓN DE RAULÍ

El prototipo general de clonación de raulí se encuentra descrito en Gutiérrez *et al.* (2005). Este modelo fue obtenido durante el desarrollo del proyecto FDI 00C7FT-12 “Silvicultura Clonal en Raulí para Incrementar la Productividad de Sitios Forestales en la IX y X Regiones del país”, ejecutado por el Centro de Experimentación Forestal CEFOR, la Universidad Austral de Chile (UACH) y el Instituto Forestal (INFOR), con la participación de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y el Instituto de Investigaciones

Agropecuarias (INIA), contando con el financiamiento del Fondo de Desarrollo e Innovación FDI de CORFO. Posteriormente, el procedimiento de micropropagación fue depurado para propósitos comerciales por Sabja *et al.* (2008).

La micropropagación directa (organogénesis) o propagación clonal es una de las aplicaciones más utilizadas del cultivo *in vitro*, donde a partir de un fragmento (explante) de una planta madre se obtiene una descendencia uniforme con plantas genéticamente idénticas (rametos). Esta técnica se aplica para acelerar la propagación en aquellas plantas que tienen problemas de propagación a partir de semillas o por otros métodos de propagación. Para raulí, el proceso de propagación *in vitro* utiliza explantes originados desde árboles adultos altamente seleccionados, obtenido por INFOR entre los años 1997-1999.

Dicho material ha sido licenciado a PLANGEN, en cuyos laboratorios e invernaderos se realiza el proceso de micropropagación, en ambientes con temperaturas y fotoperiodo controlados, utilizando medios nutritivos y hormonas específicas para las distintas etapas del proceso. De esta forma se estimula la producción de brotes axilares y posteriormente raíces, obteniéndose plantas que superen el control de calidad. Es importante señalar que también se evaluará sistemáticamente el costo y efectividad de la macro y micropropagación, para luego recomendar una de ellas o una combinación.

Las etapas de este proceso de micropropagación se esquematizan en la **Figura 3** y se describen a continuación.

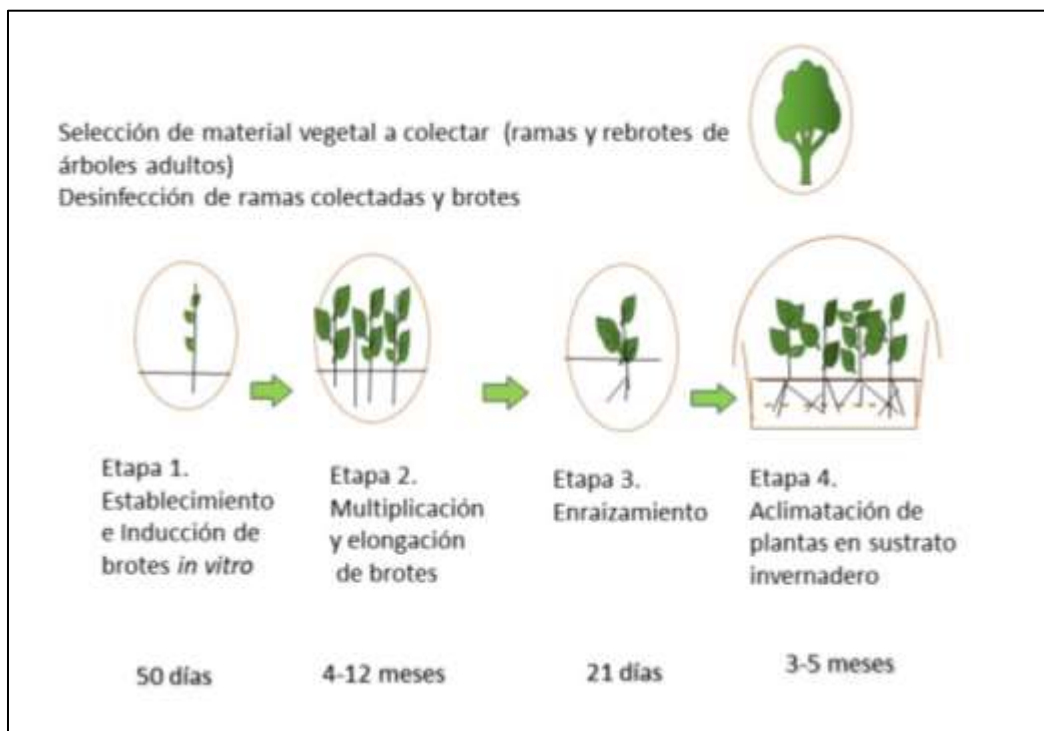


Figura 3. Etapas de la micropropagación de raulí.

- **Etapa 1:** Establecimiento del material vegetal (explantes) en condiciones *in vitro* para iniciar la producción de micro brotes considerando las condiciones genéticas y epigenéticas (juventud).
- **Etapa 2:** Inducción y elongación de brotes, es la fase en que se producen múltiples brotes para su posterior enraizamiento.
- **Etapa 3:** Enraizamiento, corresponde a la inducción de raíces adventicias en los brotes individuales del paso anterior, con la finalidad de obtener *vitroplantas* completas.

- **Etapa 4:** Aclimatación, es el proceso mediante el cual las plántulas obtenidas *in vitro*, en condiciones heterotróficas, se acondicionan gradualmente en invernadero de condiciones controladas, para que puedan continuar viviendo en condiciones autotróficas, *ex vitro*, y posteriormente soporten las condiciones de intemperie.

CONCLUSIONES

La micropropagación del raulí es una alternativa viable y prometedora para abordar los desafíos de la producción de madera de alta calidad y la conservación de esta especie nativa. La micropropagación es una técnica madura, apropiada para ser implementada a escala comercial. El uso de la micropropagación, junto con la selección genética adecuada, ofrece una oportunidad para mejorar la productividad y calidad de las plantaciones de raulí. Es necesario seguir investigando para optimizar los costos y la eficiencia tanto de la macropropagación como de la micropropagación, y así determinar la mejor combinación estratégica para la producción comercial de raulí.

REFERENCIAS

- Donoso, C., Premoli, A., Gallo, L. & Ipinza, R. (2004).** Variación intraespecífica en las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. Primera edición. Editorial Universitaria S.A. ISBN: 956-11-1702-9. 420 p.
- Gutiérrez, B., Ortiz, O. & Molina, M. (Eds). (2005).** Clonación del raulí: Estado actual y perspectivas. CEFOR-INFOR-UACH. ISBN 956-8274-56-1. Concepción, Chile. 174 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/17411>
- Ipinza, R. A., Gutiérrez, B. & Emhart, V. (2000).** Domesticación y mejora genética de raulí y roble. Universidad Austral de Chile - Instituto Forestal. Primera edición. Editora e Imprenta Maval Ltda. ISBN 956-288-691-3. 468 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/462>
- Jacob-Dazarola, R. (2024).** Caracterización experiencial de maderas nativas de Chile: Ficha raulí. En: <https://maderanativachile.cl/catalogo/rauli/>
- Pardo, E. (2024).** Precios Forestales. Instituto Forestal, Chile. Boletín N° 189. 34 p.
- Sabja, A., Ortiz, O. & Triviño, C. (2008).** Avances de clonación in vitro de árboles adultos de raulí (*Nothofagus alpina* Poepp. et Endl. Oerst.) para propagación comercial. *Agrociencia*, 42(5): 595-603.



APUNTE

Simposio Migración asistida de *Araucaria araucana*: Causas, acciones y perspectivas futuras.Roberto Ipinza Carmona^{1*} & Santiago Barros Asenjo².¹ Instituto Forestal, sede Los Ríos. Valdivia, Chile. Roberto.ipinza@infor.cl² Instituto Forestal, sede Metropolitana. Santiago, Chile.

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.612>

Recibido: 15.06.2024; Aceptado 20.07.2024.

RESUMEN

En 2019 INFOR inició un programa sobre migración asistida de *Araucaria araucana*. Este programa ha instalado 54 ha de ensayos de procedencia y progenies, dentro y fuera de las áreas de distribución natural de la especie entre las regiones del Biobío y Aysén, donde se incluyen 458 familias de la distribución andina y costera de la especie.

El interés nacional e internacional generado por este programa motivó la organización y realización del Simposio «Migración Asistida de *Araucaria araucana*: causas, acciones y perspectivas futuras». Este evento fue organizado por INFOR en forma paralela al VIII Congreso Forestal Latinoamericano (CONFLAT) y al V Congreso Forestal Argentino, que tuvieron lugar en la ciudad de Mendoza, Argentina, del 27 al 30 de marzo de 2024. Los principales alcances de este Simposio se detallan en el presente documento.

Palabras clave: *Araucaria araucana*, Migración asistida.

SUMMARY

In 2019 INFOR initiated a program about assisted migration of *Araucaria araucana*. Currently it has installed 54 ha of progeny provenance trials, inside and outside the natural distribution areas of the species between the regions of Biobío and Aysén, where 458 families of the Andean and coastal distribution of the species are included.

The national and international interest generated by this program motivated the organization and holding of the Symposium "Assisted Migration of *Araucaria araucana*, causes, actions and future perspectives". This event was organized by INFOR as a parallel event to the VIII Latin American Forestry Congress (CONFLAT) and the V Argentinean Forestry Congress, which took place in the city of Mendoza, Argentina, from 27 to 30 March 2024. The main scope of this Symposium is detailed in this document.

Key words: *Araucaria araucana*, assisted migration

INTRODUCCIÓN

La *Araucaria araucana* es una especie emblemática de los bosques de Chile y Argentina que en los últimos años ha estado sometida a una fuerte presión de selección debida al cambio climático, el que la ha predispuesto al denominado daño foliar de la araucaria (DFA), enfermedad que está comprometiendo al 85% de las poblaciones chilenas de esta especie y que ha motivado el cambio de su estado de conservación, particularmente en las procedencias de la Cordillera de la Costa, desde Vulnerable a En Peligro de Extinción.

Como una medida de conservación para sobrellevar este adverso escenario, INFOR dio inicio a un visionario programa de migración asistida. En esta iniciativa de migración se recolectó semillas desde 458

individuos representativos de sus poblaciones a lo largo de su distribución natural en las Cordilleras de la Costa (2 estratos genéticos) y de Los Andes (3 estratos genéticos).

Las semillas fueron viverizadas, con el importante apoyo de Forestal Mininco (CMPC), manteniendo la identificación familiar (árbol madre), y dieron origen a una extensa colección de plantas que se ha establecido en terreno en un total hasta ahora de 54 ha, en seis unidades de conservación, estructuradas todas ellas como ensayos de progenie y procedencia, e instaladas en áreas de acogida tanto fuera como dentro de la distribución natural de la especie, desde la región del Biobío a la región de Aysén. Estas áreas de acogida fueron previamente seleccionadas mediante proyecciones climáticas para los próximos 50 y 70 años, de modo que presenten condiciones idóneas para el desarrollo de araucaria, en términos de ofrecer el menor estrés bioclimático integral, entendido este como un índice que promedia los estreses térmicos por altas y bajas temperaturas y el estrés hídrico estival.

En general, el programa de migración pretende salvaguardar el potencial evolutivo de la araucaria y establecer poblaciones base para futuras iniciativas de restauración con el material genético rescatado. En tal contexto, en noviembre de 2022, durante el Congreso Chileno de Ciencias Forestales, realizado en Santiago, especialistas argentinos que participaban en este y que estaban empezando a organizar el VIII Congreso Forestal Latinoamericano (CONFLAT) y el V Congreso Forestal Argentina, a efectuarse en Mendoza en 2023, invitaron a investigadores de INFOR a estudiar la posibilidad de realizar un evento paralelo, en el tema de la Migración de la Araucaria, bajo el auspicio del CONFLAT 2023.

Se estudió esta posibilidad en INFOR y se revisó su factibilidad con especialistas nacionales en araucaria, los cuales se interesaron en la propuesta. Se tomó la decisión institucional de llevar adelante la idea, lográndose el auspicio de BIOFOREST (Arauco). La línea de investigación Conservación y Mejoramiento Genético de INFOR procedió al desarrollo de un programa con el apoyo de BIOFOREST, Universidad de Chile, Universidad de Concepción e INTA de Argentina, el cual una vez consensuado se postuló a CONFLAT 2023 siendo aceptado. Esto condujo a que, como evento paralelo a CONFLAT 2023 en Mendoza, Argentina, se efectuase el Simposio “Migración Asistida de *Araucaria araucana*: Causas, Acciones y Perspectivas Futuras”, cuyos principales alcances se resumen en este documento.

SIMPOSIO MIGRACIÓN ASISTIDA DE *Araucaria araucana*

Programa

El simposio se desarrolló el día 27 de marzo de 2023, en la ciudad de Mendoza, Argentina, como evento paralelo dentro del VIII Congreso Forestal Latinoamericano CONFLAT 2023. El programa del evento se detalla en la **Figura 1**, donde se especifican las presentaciones de los investigadores del Instituto Forestal de Chile (INFOR), Bioforest (Arauco), Universidad de Chile (UCh), Universidad de Concepción (UdeC) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Argentina (**Figura 2**).

La apertura estuvo a cargo de la Directora Ejecutiva de INFOR, Dra. Sandra Gacitúa, quien puso en muy especial relieve el enfoque público privado de esta importante actividad de rescate genético para la conservación de esta emblemática especie forestal, crecientemente amenazada por el cambio climático. La Dra. Gacitúa destacó la cooperación de entidades de los sectores público y privado para iniciar el proceso de migración asistida de la especie con las primeras 54 ha de ensayos de procedencia-progenie establecidos en Chile entre las regiones de Biobío y Aysén.

PROGRAMA	
VIII Congreso Forestal Latinoamericano V Congreso Forestal Argentino  	
SIMPOSIO Migración asistida de Araucaria (<i>Araucaria araucana</i> (Mol.) K. Koch.): causas, acciones y perspectivas futuras	
Organizado por: Instituto Forestal (INFOR) Chile - (robertoipinza@infor.cl)	
Fecha: 27 de marzo de 2023	
Horario: 10:45 hs. a 16:00 hs.	
Lugar: Sala Horcones. Centro de Congresos y Exposiciones "Dr. Emilio Civit", Ciudad de Mendoza	
10:00 a 10:45	Registro
10:45 a 11:00	Migración Asistida: Un enfoque Público-Privado para abordar el cambio climático. Dra. Sandra Gacitúa. Directora Ejecutiva. INFOR. Chile
11:00 a 11:30	El cambio climático. ¿Por qué, cuándo y cómo hacer Migración Asistida? Dr. Roberto Ipinza. Investigador. INFOR. Chile
11:30 a 12:00	Estado actual de los aspectos sanitarios de la <i>Araucaria araucana</i>. Dr. Rodrigo Ahumada. Investigador Bioforest, Arauco. Chile
12:00 a 12:30	Programa de Migración Asistida de la <i>Araucaria araucana</i> en Chile. Dr. Roberto Ipinza. Investigador. INFOR. Chile
12:30 a 13:00	Discusión Moderador: Dr. Leonardo Gallo. INTA. Argentina
13:00 a 14:00	Almuerzo
14:00 a 14:30	Caracterización temprana de procedencias de <i>Araucaria araucana</i> para selección de material. Dr. Carlos Magni. Investigador Universidad de Chile. Chile.
14:30 a 15:00	Sistema de Base de Datos de la <i>Araucaria araucana</i>. Ing. Jorge González. Investigador. INFOR. Chile
15:00 a 15:30	Genómica para establecer estrategias de flujo génico y migración asistida. Dr. Rodrigo Hasbún. Investigador Universidad de Concepción. Chile. Moderador. Dr. Roberto Ipinza. INFOR. Chile
15:30 a 16:00	Discusión y Cierre Reflexiones sobre Migración Asistida en un mundo cambiante Moderador: Dr. Leonardo Gallo. INTA. Argentina

Figura 1. Programa del simposio



Figura 2. Expositores del simposio. De izquierda a derecha: Rodrigo Hasbún Zaror (UdeC), Carlos Magni Díaz (UCh), Rodrigo Ahumada Núñez (Bioforest), Leonardo Gallo (INTA), Roberto Ipinza Carmona (INFOR) y Jorge González Campos (INFOR).

Desarrollo

El Dr. Roberto Ipinza se refirió, en dos presentaciones, a las principales causas asociadas al cambio climático que están incidiendo en la sobrevivencia de la especie, para destacar posteriormente cómo la migración asistida surge como la tecnología de conservación genética más apropiada para salvaguardar su potencial adaptativo, explicando detalladamente el proceso de migración asistida de *Araucaria araucana* puesto en práctica en Chile en términos operacionales.

Las **Figuras 3, 4 y 5** ilustran algunos de los aspectos fundamentales del programa de migración asistida presentado. La descripción completa del programa puede consultarse en Ipinza *et al.* (2024), en tanto que los trabajos *in extenso* del simposio en versión powerpoint se pueden revisar en Ipinza *et al.* (2023).



Figura 3. Viverización de plantas

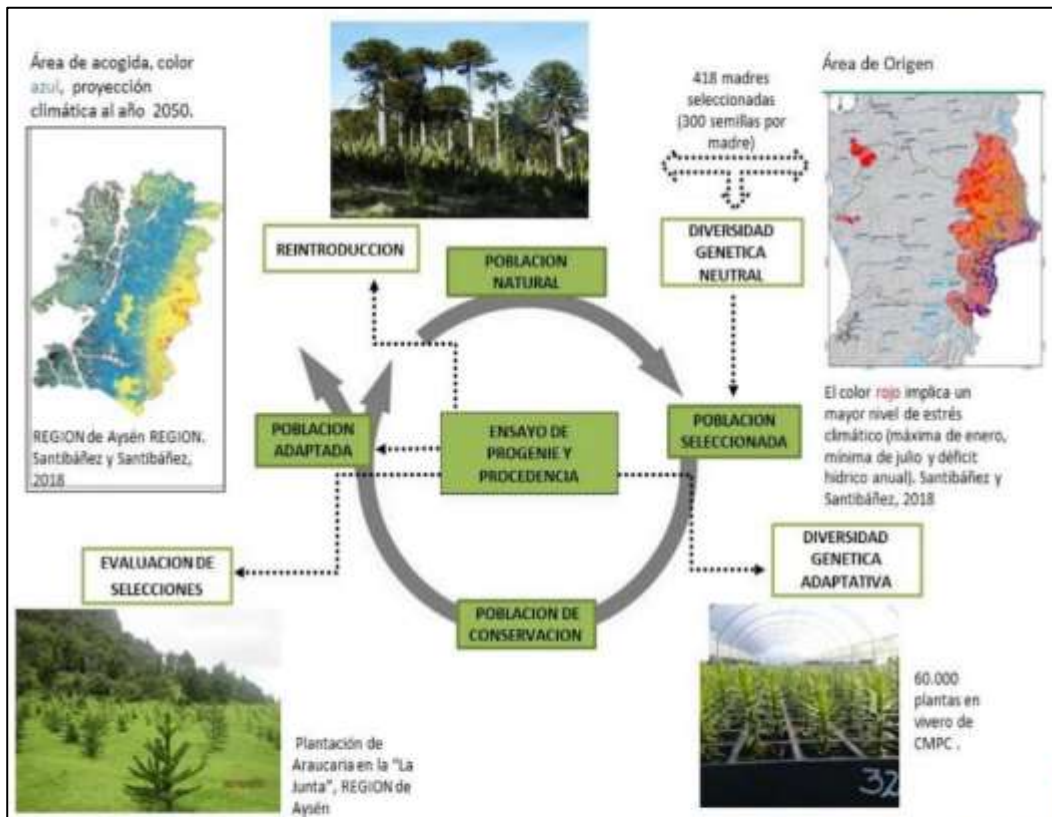


Figura 4. Modelo de migración asistida



Figura 5. Establecimiento de ensayos de procedencia progenie

El Dr. Rodrigo Ahumada señaló la presencia de hongos nativos patógenos que son los responsables del síndrome Daño Foliar de la Araucaria (DFA) (**Figura 6**), indicando que se ha identificado a *Pewenomyces kutranfy* como agente causal principal, y a otras tres especies del mismo género asociadas al daño. El profesional analizó el programa futuro para entender la dinámica patológica en el contexto del cambio climático, comentando también que dos fungicidas, Captan y Tebuconazol, logran inhibir el crecimiento *in vitro* del hongo.



Figura 6. Daño foliar de la araucaria (DFA).

El Dr. Carlos Magni, mostró los análisis efectuados durante las etapas iniciales de la viverización, para demostrar la variabilidad morfológica y fenológica de la muestra de procedencias y familias de araucaria (450 familias) utilizadas para iniciar la migración asistida (**Figura 7**). Analizando la germinación y el crecimiento inicial de plantas, comparados con muestras adicionales de semillas (4 lotes comerciales),

indicó diferencias significativas en el efecto del contenido de humedad inicial de las semillas sobre la germinación y sobre el crecimiento inicial de las plantas. Revisó caracteres tempranos de plantas en ensayo de progenies en vivero, que le permitieron detectar que las diferencias morfológicas son influenciadas por variables geográficas y climáticas de las procedencias (**Figura 8**).

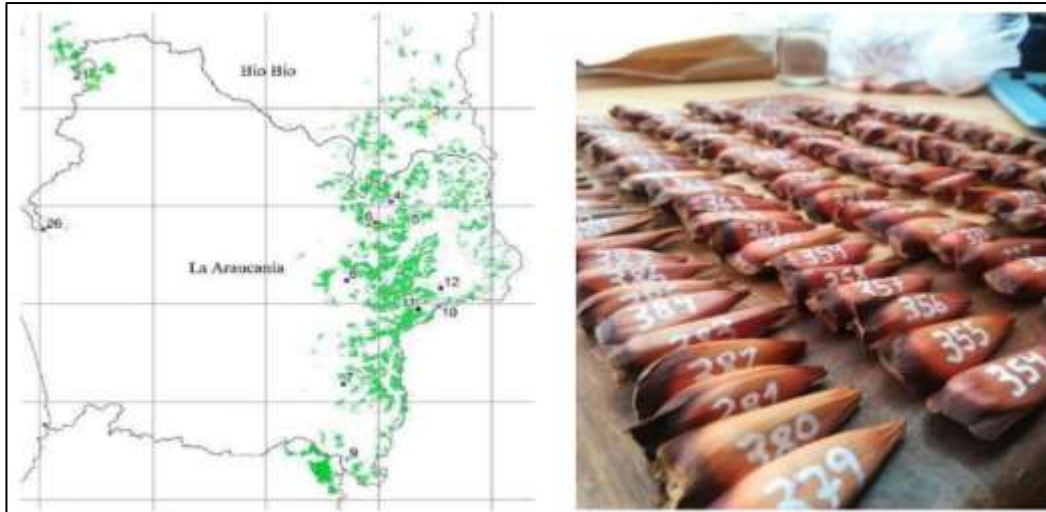


Figura 7. Colección de semillas analizadas.



Figura 8. Material para plantación

El Ing. Jorge Gonzalez explicó en detalle el sistema de base de datos del proyecto de Migración Asistida de *Araucaria araucana*. Desde los árboles madres y sus procedencias, las semillas y la viverización de plantas, hasta los ensayos de procedencia progenie (**Figura 9**), que generan un gran cúmulo de información y registros, donde el sistema de base de datos constituye la columna vertebral para la toma de decisiones que permitan optimizar y monitorear el proceso a lo largo del tiempo.



Figura 9. Plantas y ensayos de terreno

El Dr. Rodrigo Hasbún estableció una estrategia de flujo genético para la migración asistida de *Araucaria araucana*, planteando que al combinar la genómica ecológica y el modelado de nicho se puede evaluar las respuestas de las poblaciones sujetas al cambio climático (**Figura 10**). Planteó el desplazamiento genómico como una medida del desajuste en la asociación genotipo clima y los futuros climas potenciales. Así, la idea de buscar poblaciones donantes de genes con adaptación resulta atractiva.

Al cierre del simposio, el Dr. Leonardo Gallo formuló una serie de reflexiones sobre las poblaciones de araucaria en Argentina, entre ellas su distribución longitudinal muy fragmentada y bajo una marcada heterogeneidad, sus distancias de polinización, la dispersión de sus semillas y las presiones a que están sometidas desde los puntos de vista ambientales y sociales (**Figura 11 y 12**). Comentó respecto a diferentes iniciativas que se han desarrollado para el estudio y conservación de la araucaria (**Figura 13**). Finalmente, realizó un sucinto resumen, destacando en primer lugar el modelo público privado involucrado en el rescate genético de las poblaciones de esta icónica especie forestal. En segundo lugar, planteó la importancia de haber iniciado un programa de conservación para salvaguardar el potencial evolutivo y, por último, recomendó monitorear los ensayos de progenie y procedencia para continuar estudiando la biología reproductiva de la araucaria, la relación genotipo-clima-enfermedades y la expresión de genes adaptativos.

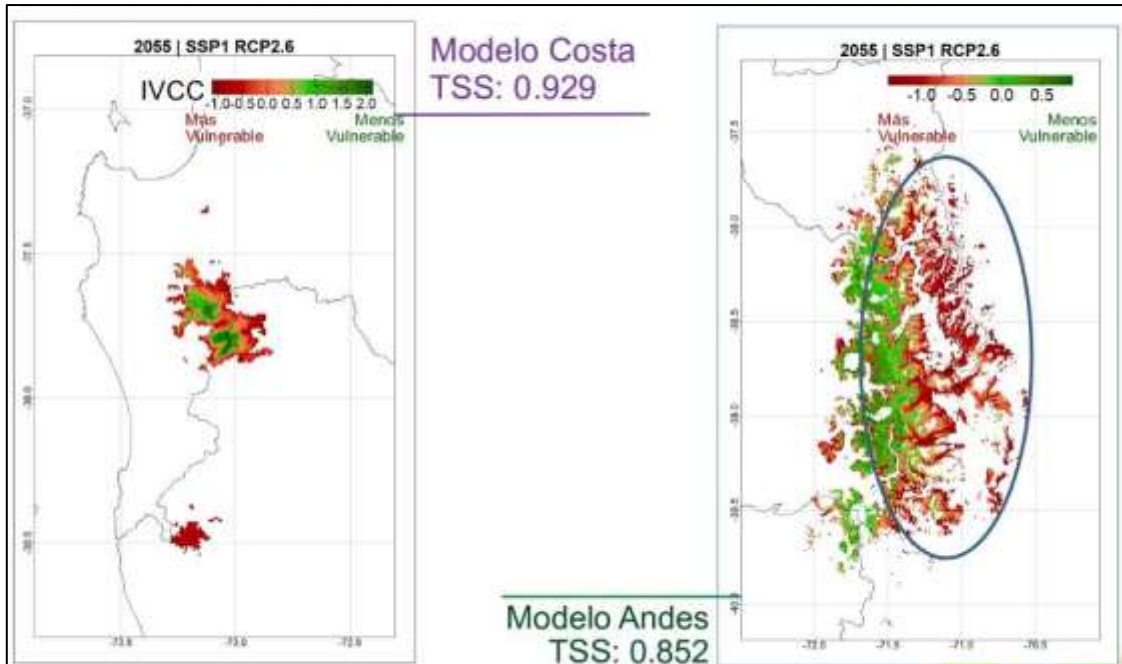


Figura 10. Distribución de araucaria y vulnerabilidad al cambio climático



Figura 11. Bosque andino patagónico, Argentina



Figura 12. Población araucaria-ciprés Pulmari, Argentina

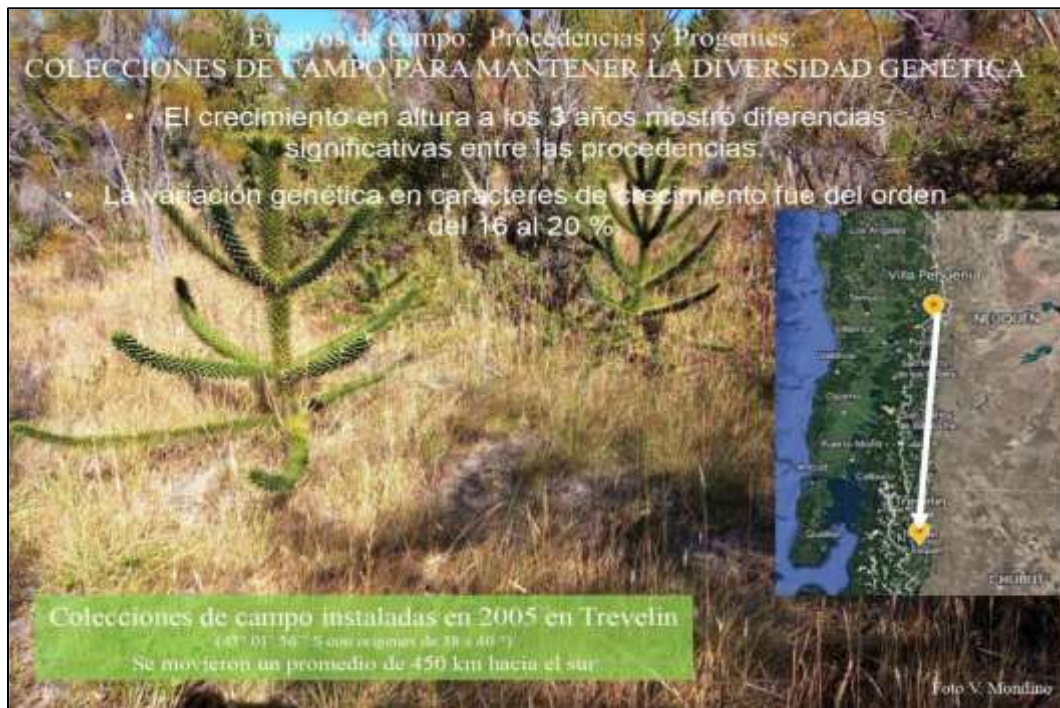


Figura 13. Ensayo de procedencia progenie de araucaria en Trevelín, Argentina

CONCLUSIONES

El simposio arrojó conclusiones esenciales sobre la migración asistida de la araucaria, una estrategia diseñada para proteger el potencial evolutivo de la especie frente a los desafíos del cambio climático. Se

está llevando a cabo un traslado mediante ensayos de progenies y procedencias, tanto dentro como fuera del área natural de distribución de la especie. Esta metodología permite la expresión de la variación genética adaptativa, como la supervivencia y rasgos de crecimiento, facilitando la selección y uso del germoplasma de las araucarias sobrevivientes para restaurar áreas afectadas por el cambio climático y otras presiones.

La colaboración interinstitucional, que incluye universidades, empresas forestales, comunidades pehuenches, CONAF, INFOR y entidades internacionales como FAO SIMEF, ha establecido un modelo de relación público-privada que ha sido esencial para el desarrollo del proyecto. Este modelo puede ser replicado para otras especies amenazadas por el cambio climático.

Desde una perspectiva patológica, se identificó a *Pewenomyces kutranfy* como el principal agente del cancro en araucaria. Además, fueron identificadas tres nuevas especies del mismo género asociadas al daño causado por *P. kutranfy* y se determinó que dos fungicidas inhiben el crecimiento del hongo *in vitro*.

Se destacó la importancia de combinar la genómica con el modelado de nicho ecológico para evaluar las respuestas de las poblaciones al cambio climático. La idea de buscar poblaciones donantes de genes adaptativos es prometedora y puede ofrecer soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos del cambio climático.

En situaciones de crisis, la migración asistida se presenta como una herramienta crucial. Es esencial muestrear en todo el rango de distribución natural de la especie y cosechar en años de máxima productividad de semilla. En un horizonte de 30 años, será necesario asistir durante décadas a la regeneración de la población traslocada, trasladando piñones dentro del sitio para reemplazar a los dispersores y monitorear si ocurre un reemplazo de estos.

Con el inicio de la producción de semillas, se prevé un impacto ambiental debido a una mayor disponibilidad energética en el sistema. Sin embargo, es importante reconocer que solo es posible asistir a la migración de una fracción muy pequeña de la biodiversidad y bajo ciertas circunstancias la migración asistida es la decisión correcta.

REFERENCIAS

- Ipinza, R., González, J., Molina, M., Gutiérrez, B., Soto, H., Koch, L., Hasbún, R. et al. (2024).** Migración Asistida de *Araucaria araucana* (Molina). K. Koch. Un Modelo para Salvaguardar el Potencial Adaptativo de una Especie Emblemática de los Bosques de Chile. Ciencia & Investigación Forestal, 30(1): 29-41. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.605>
- Ipinza, R., Gonzalez, J., Molina, M., Gutiérrez, B., Barros, S., Koch, L. & Soto, H. (2023).** Organización y Desarrollo del simposio "Migración Asistida de *Araucaria araucana*, causas, acciones y perspectivas futuras", en el contexto del VIII Congreso Forestal Latinoamericano (CONFLAT) y el V Congreso Forestal Argentina, celebrados en la Ciudad de Mendoza, Argentina. 27 a 30 de marzo del 2023. Informe Interno, Instituto Forestal, Chile.

Volumen 30 N° 2. Agosto, 2024

CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL



www.infor.cl
<https://revista.infor.cl>